REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Thème: L'effet du champ magnétique sur développement des défauts d'occlusion d'air provoquée par l'injection du métal liquide

- Présenté par :
  - **Filali Youcef**
  - **Fillali Mohamed**
- Proposé et Dirigé par :
  - **Zirari Mounir**

Promotion septembre 2020

Remerciement

Tout d'abord, je voudrais remercier Dieu pour le courage et la force qu'il nous a donnés pour accomplir cet humble travail que nous désirons le plus, tout en adressant mes remerciements au superviseur, le Dr Zirari Mounir, pour les efforts qu'il a déployés pour nous.

Et celui qui a consacré un temps précieux à ce travail. Et nous a encouragés à continuer et à persévérer

Et les membres du jury d'accepter notre travail d. Zirari Mounir

Et toute personne qui nous a aidés ou accompagnés dans ce travail, directement ou indirectement, tout au long de la période de travail.

J'adresse également des remerciements particuliers à ma mère et à ma famille élargie pour le soutien et l'assistance inlassables qu'ils nous ont apportés tout au long de mes études.

Dédicace

Cet humble acte est dédié à L'âme de mon père Al-Tahira, que Dieu illumine sa tombe.

À ma mère, qui a toujours été mon soutien dans cette vie, que Dieu prolonge sa vie.

À ma chère épouse, qui a été mon soutien tout au long de mon travail.

A mes chers frères, le barrage imprenable, que Dieu les protège tous.

À tous mes professeurs, cheikhs, amis et à tous ceux qui me sont reconnaissants.

YOUCEF

Sommaire

Nomenclature I

INTRODUCTION GENERAL II

Chapitre I: Généralités sur le procédé de moulage

I.1 Introduction 4

I.2 le Moulage 4

I.2.1. Généralités sur le moulage 4

I.2.3. Possibilité et avantage des moulages 8

I.2.4. Les inconvénients du moulage 8

I.2.5. Classification des procédés de moulage 8

I.3. Les techniques de moulage 9

I.3.1. Moulage en sable 9

I.3.1.1. Avantages du procédé 10

I.3.1.2. Inconvénients du procédé 10

I.3.2. Moulage mécanique 10

I.3.2.1 Par pression 11

I.3.2.2. Par secousses 11

I.3.2.3. Par projection 12

I.3.2.4. Par secousses et par pression 12

I.3.3. Moulage par modèle perdu 13

I.3.3.1. Procédé par modèle gazéifiable 13

I.3.3.2. Principe de fonctionnement du procédé par modèle gazéifiable 14

I.3.3.3. Moulage à la cire perdue 15

I.3.4. Moulage en moule métalliques 15

I.3.4.1. Différents procédés de moulage en coquille 15

I.3.4.2. Moulage en coquille par gravité 16

I.3.4.3. Moulage en coquille basse pression 16

I.3.4.4. Moulage sous pression 16

I.3.5. Moulage par forgeage liquide 17

I.3.6. Moulage avec refroidisseurs 19

I.3.7. Moulage magnétique 19
I.3.7. 1. Configuration expérimentale 20
I.3.7.2. Procédure expérimentale 21
1. Préparation de l'installation magnétique 21
2. Motif EPS et revêtement réfractaire 21
3. Formation du moule magnétique 22
4. Coulée 22
I.3.7.3. Effet du champ magnétique sur l'orientation de la fibre pendant le processus de remplissage dans le moulage par injection : 23
I.3.8. Matériaux ferromagnétiques 24
I.3.8. 1. Propriétés des matériaux ferromagnétiques 26
I.4. Le remplissage 26
I.5. Défauts de moulage 26
I.5.1. Défauts formés pendant le retrait de solidification 27
I.5.3. Défaut du au matériau avec lequel est réalisé le moule 29
I.5.4. Défaut formé pendant le remplissage du moule 30
I.5.5. Défaut d'élaboration 30
I.6. Conclusion 30
I.7 L'état de l'art 30

Chapitre II :

Formulation mathématique

II.1.Introduction 35
II.1. Modélisation de l'écoulement des fluides 35
II.1.1. Equation de continuité 35
II.1.2. Equation de quantité de mouvement 35
II.1.3. Equation de conservation d'énergie 36
II.2. Modélisation thermique 37
I I.2.1-Différentes modes de transfert de chaleur 37

II.2.1.1.1. Cas des gaz 38

II.2.1.1.2. Cas des liquides 38

II.2.1.1.3. Cas des solides 38

II.2.1.1.4. Loi de Fourier 38

II.2.1.2- Transfert de chaleur par convection 39

a- La convection naturelle 40

b- La convection forcée 40

II.2.2.3- transfert de chaleur par rayonnement 40

II.3. Les conditions aux limites 42

II.3.1. Condition de Dirichlet 42

II.3.2. Condition de Robin-Fourier 42

II.4. Modèle de turbulence k-ε 42

II.4.1. Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k 43

II.4.2. Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ε 43

II.5. La méthode volume-of-fluide (VOF) 44

II.5.1. Calculs équilibrés et transitoires de la méthode VOF 44

II.5.2. Equation de la fraction volumique 45

II.6. CONCLUSION 46

Chapitre III :

Les méthodes discrétisation

III.1.INTRODUCTION : 48

III.2. Méthodes de discrétisation : 48

III.2.1. Méthode des différences finies 50

1. Avantage 50

2. Inconvénients 50

III.2.2. Méthode des volumes finis..... 50

1. Avantage 50

2. Inconvénients 50

III.2.3 Méthode des éléments finis 51

1. Avantage 51

2. Inconvénients 51

III.3. Calcul d'interfaces : 51

III.3.1 Maillage : 52

III.3.1. 1. les méthodes lagrangiennes 53

III.3.1.2. Les méthodes eulérienne 53

III.3.1.3 Les méthodes de suivi de front : 54

III.3.1.4 Les méthodes de suivi de volume : 54

III.4. Simulation numérique en fonderie 56

III.4.1. Mise en œuvre numérique : 57

III .5. Logiciel de simulation ANSYS 57

III .5.1. Définition de la géométrie : 59

III .5.1.1 Définition des matériaux et des paramètres du procédé : 59

III .5.1.2. Maillage de la géométrie : 60

III .5.1.3. Calculs : 62

III .5.1.4.Visualisation et analyse des résultats : 62

III .6. Conclusion : 63

Chapitre IV:

Résultats et discussion

IV. 1.Introduction : 65

IV.2. Indentification et validation de la simulation numérique 65
IV.3. Les conditions initiales : 66
IV.4. Les conditions limitent : 66
IV.5. Influence su champ magnétique 68
IV.6. Expérience 01 68
IV.6.1 interprétation des résultats de simulation : 68
IV.6.2 Champ de pression 70
IV.6.3 Champ de température 71
IV .7. Expérience 02 73
IV.7.1 Champ de pression 74
IV.7.2 Champ de température 75
IV. 7.3.1 Champ de pression 78
IV.7.3.2 Champ de température 79
IV.7.4 Champ de pression 81
IV.7.4.1 Champ de température 82
IV.8 l'emplacement des capteurs pour l'analyse 84
IV.9 Comparaison entre la première et la deuxième expérience 85
IV.9.1 : température 86
IV.9.2 : champ de pression 88
IV. 10 Conclusion 92
Conclusion générale 94
Références Bibliographiques

Listes des figures

Chapitre I :

Figure. I.1 : représenté d'un moule complet. 5
Figure.I.2 : Principe de la fabrication de pièces de fonderie 6
Figure. (I.3) : Principe de moulage en moule non permanent 7
Figure. (I. 4): exemple sur moulage en moule permanent 8
Figure (I.5) : présenté le moulage en sable 10
Figure (I.6): Plaque modèle double 11

Figure (I.7) : Moulage par pression 11
Figure (I.8) : Serrage par secousses 11
Figure (I.9) : Système de projection..... 12
Figure (I.10) : Système d'aide au démontage..... 12
Figure.I.11 : séquences du procédé de moulage par modèle gazéifiable..... 15
Figure.I.12 : moulage en coquille par gravité..... 16
Figure.I.13 : Moulage en coquille sous pression..... 17
Figure (I.14) : Moulage par forgeage liquide 18
Figure (I.14) : Configuration fabriquée 21
Figure (I.15) : Modèle CAE de la conception finale du moule magnétique..... 20
Figure (I.16) : Répartition du moment magnétique de la fibre pendant le processus de remplissage en raison du champ magnétique externe**. ……** 24
Figure (I.17) : la direction du champ magnétique 25
Figure (I.18) : matériaux ferromagnétiques et ferrimagnétiques associés à la température**.** 25

Chapitre II :

Figure(II.1) : Différent mode de transfert thermique..... 37
Figure(II.2) : Conduction thermique..... 39
Figure(II.3) : Convection thermique 40
Figure(II.4): transfert thermique par rayonnement 41

Chapitre III :

Figure(III.1) méthode de discrétisations 49
Figure (III.2) : **:** Présentation des méthodes de calcul d'interface **……...** 52
Figure (III.3) : Maillage carré **……** 53
Figure(III.4): Différentes méthodes de suivi de front**……..** 54
Figure(III.5) : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque **…….** 55
Figure(III.6) : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret 55
Figure(III.7): Définition de la géométrie**……** 59
Figure(III.8): Définition des propriétés des matériaux**……....…..…...** 60
Figure(III.9) : Maillage de la géométrie**……....** 61

Figure(III.10): Phase du Calcul…….. 62

Chapitre IV :

Figure.IV.1 : le moule multi-empreinte de validation …… 65

Figure.IV.2 : (a) Champs de fraction volumique de résultats de simulation Thierry BARRIERE,Boasheng LIU, Jean-Claude GELIN. (b) simulation notre analogique par le code de ANSYS. …….. 66

Figure. (IV.3) :la géométrie 67
Fig. (IV.4) : le maillage de la géométrie …… 68
Fig. (IV.5) :Volume de fraction pendant le remplissage du moule …… 69
Fig.(IV.6) Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul.....70
Fig. (IV.7) la variation de pression dans le temps pour de différent position. ……. 70
Fig.(IV.8) Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul..... 71
Fig.(IV.9) variation température dans le temps pour de différent position . ……. 72
Figure. (IV.10) Volume de fraction pendant le remplissage du moule …….. 73
Fig.(IV.11) Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul 74
Fig. (IV.12) la variation de pression dans le temps pour de différent position. …… 75
Fig.(IV.13) Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul 75
Fig.(IV.14) variation température dans le temps pour de différent position …… 76
Figure. (IV. 15) Volume de fraction pendant le remplissage du moule.....77
Fig.(IV.16) Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul 78
Fig. (IV.17) la variation de pression dans le temps pour de différent position.....78
Fig.(IV.18) Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul.....79
Fig.(IV.19) variation température dans le temps pour de différent position …….. 79
Figure. (IV.20) Volume de fraction pendant le remplissage du moule …… 81
Fig.(IV.21) Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul 81
Fig. (IV.22) la variation de pression dans le temps pour de différent position. …… 82
Fig.(IV.23) Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul.....82
Fig.(IV.24) variation température dans le temps pour de différent position …… 83
Fig.(IV.24) variation température dans le temps pour de différent position …… 84
Figure (VI.26) : détection des défauts de remplissage dans les empreintes…….. 85
Figure (IV.27) Comparaison entre les Champs des températures dans chaque point pour les deux simulations …… 87

Figure (IV.28) Comparaison entre les Champs des Pression dans chaque point pour les deux simulations. **…….....** 90
Fig. (IV.29) Volume de fraction pendant le remplissage du moule**……..** 91

Liste des tableaux

TAB.I.1 : classification les procédés de la fonderie…… 9

Chapitre III :

Tableau (1.1) : Logiciels de simulation utilisés en fonderie……. 57

Chapitre IV :

Tableau (IV.1) : les propriétés thermiques de fer ……... 67
Tableau (IV.2) : les propriétés de matériaux du moule en acier …… 67

Nomenclature

Symboles Latins

M : l'intensité de l'aimantation.

X_m : la susceptibilité magnétique

μ_r : la perméabilité relative

B : la densité de flux magnétique

μ_0 : permittivité magnétique de l'espace libre.

H : intensité du champ magnétique périphérique appliqué.

C_p : chaleur spécifique $J.Kg^{-1}.K^{-1}$

f_{liq} : fraction liquide

g_s, g_y et g_z : composants du champ gravitationnel suivant *x*, *y* et *z* $m.s^{-2}$

H : diamètre du cylindre d'injection cm

h_0 : hauteur initiale du métal liquide cm

L : longueur du cylindre d'injection cm

L_0 : diamètre de l'orifice de refoulement cm

L_s : chaleur latente de fusion $J.Kg^{-1}$

p : pression Pa

S : terme source spécifiques au changement de phase

T : température K

t : variable du temps s

t_h : le temps ou le métal fondu atteint le haut du cylindre d'injection s

U_g: composante de la vitesse de la grille $m.s^{-1}$

U_p: vitesse du piston $m.s^{-1}$

u : vitesse suivant *x* $m.s^{-1}$

Nomenclature

v : vitesse suivant y $m.s^{-1}$

w : vitesse suivant z $m.s^{-1}$

x, y, z : coordonnées cartésiennes

dQ : Énergie élémentaire en Joule

λ : Conductivité thermique du matériau en $W.m^{1}.K^{-1}$

A : section

dt : temps élémentaire s

$\frac{dT}{dx}$: Gradient de température en x

A : surface d'échange (m^2)

ε: coefficient d'émission de la surface (ε= 1 pour un corps noir, ε<<1 corps brillant)

Ts : température de surface du corps K

Ta: température ambiante.

$\boldsymbol{\rho} C_p \frac{DT}{Dt}$:La variation totale d'énergie

$\boldsymbol{\rho} C_p U.\nabla T$: La variation d'énergie par convection

div (**λ** gradT) : La variation d'énergie par conduction

∅ : La dissipation irréversible due au frottement visqueux

α, β : constates réelles positive

v_{ss}, v_{yy}, v_{zz} : contraintes visqueuses normales $N.m^{-2}$

τ_{yx}, v_{yz}, v_{zs} : contraintes visqueuses tangentielles $N.m^{-2}$

ρ : masse volumique $Kg.m^{-3}$

q_O : masse volumiquede référence Kg.m^{-3}

μ : viscosité dynamique Kg. m^{-1}.s

h : conductivité thermique W.m

Δt : pas de temps s

ε : le taux de remplissage du cylindre d'injection %

$\boldsymbol{\sigma}$: constante de Stephan Boltzmann 5.67 10^{-8}W.m^{-2}.

A : surface d'échange m^2

$\boldsymbol{\varepsilon}$: coefficient d'émission de la surface (ε= 1 pour un corps noir, ε<<1 corps brillant)

Ts : température de surface du corps K

Ta : température ambiante K

Indices

Air : air

Fer : fer

Acier : acie

Nomenclature

Résumé :

Dans l'industrie des métaux, le moulage mécanique sous pression (MMSP) Prend de nos jours une place très importante, c'est l'une des techniques de fabrication utilisées dans la plupart des processus industriels .l'occlusion d'air provoquée par l'écoulement du métal liquide durant la phase lente d'injection est l'un des facteurs qui contribue au défaut de porosité. L'objectif de cette étude est d'analyser une loi d'accélération du piston afin de réduire au minimum l'occlusion d'air durant la phase lente d'injection, et de réduire ainsi la porosité dans les pièces fabriquées. Un modèle numérique tridimensionnel , basé sur les équations de la conservation de la masse, la quantité de mouvement et l'équation d'énergie ,est employé pour simuler l'écoulement du métal liquide dans la chambre d'injection .le suivi de la surface libre est assuré par la méthode VOF.

Mots clés :

- Remplissage, moule, sous pression, simulation numérique, éléments finis ; écoulement Modélisation.

Abstract : :

In the metal industry, mechanical pressure molding (MMSP) Takes a very important place these days, it is one of the manufacturing techniques used in most industrial processes. The occlusion of air caused by the flow of liquid metal during the slow injection phase is one of the factors which contributes to the lack of porosity. The objective of this study is to analyze a law of acceleration of the piston in order to minimize the occlusion of air during the slow injection phase, and thus to reduce the porosity in the manufactured parts. A three-dimensional numerical model, based on the equations of mass conservation, momentum and energy equation, is used to simulate the flow of liquid metal in the injection chamber. Tracking the surface free is provided by the VOF method.

• Keywords:

Filling, mold, pressure, digital simulation, finite elements; flow Modeling.

ملخص:

في صناعة المعادن ، صب الضغط الميكانيكيMMSP) (يحتل مكانًا مه ًما للغاية هذه الأيام ، فهو أحد تقنيات التصنيع المستخدمة في معظم العمليات الصناعية. انسداد الهواء الناجم عن تدفق المعدن السائل خلال مرحلة الحقن البطيء هو أحد العوامل التي تساهم في نقص المسامية .الهدف من هذه الدراسة هو تحليل قانون تسارع المكبس لتقليل انسداد الهواء خلال مرحلة الحقن البطيء ، وبالتالي تقليل المسامية في الأجزاء المصنعة .يتم استخدام نموذج عددي ثلاثي الأبعاد يعتمد على معادلات الحفاظ على الكتلة ومعادلة الزخم والطاقة لمحاكاة تدفق المعادن السائلة في غرفة الحقن .يتم توفير مجاني من خلال طريقةVOF.

•الكلمات الدالة:

حشو ، قالب ، ضغط ، محاكاة رقمية ، عناصر محدودة ؛ نمذجة التدفق

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'industrie mécanique est un secteur très important de l'économie du pays. C'est l'un des obstacles au progrès et au développement, qui est le niveau de développement de la modernité du pays, et la fabrication mécanique occupe une grande partie du développement industriel et contribue à améliorer les performances des moyens de production nationaux: la nouvelle stratégie industrielle mondiale s'appuie sur la haute technologie et la modernité acquises par les grands constructeurs mondiaux. L'Algérie, comme d'autres pays du monde, doit se constituer une base industrielle suffisante pour rattraper cette région, qui calcule chaque jour des progrès extraordinaires. Les techniques de fabrication existent et sont plus efficaces, cependant, l'application des principes mécaniques techniques les plus intéressants reste dans la conception et la fabrication de diverses pièces.

Le processus de MMSP (moulage mécanique sous pression) présente de nombreux avantages tels que la production rationnelle de pièces en grandes séries à côtes finies et à tolérances serrées avec un état de surface de haute qualité. Malheureusement, cette technique possède aussi des inconvénients. Dans le processus de MMSP existe un certain nombre de paramètres, lorsqu'elles sont bien déterminées et ajustés, entraîne une amélioration de la qualité des pièces moulées. Le défaut le plus commun dans les pièces fabriquées par le processus de MMSP est la porosité interne. L'une des principales causes est l'air emprisonné dans le métal liquide pendant les deux premières phases de remplissage du processus de MMSP. La porosité interne peut également apparaître sous la forme d'un rétrécissement, en raison de la solidification prématurée du métal. Normalement, les principales variables contrôlées sont la température du moule, le volume du dosage, les vitesses lentes et rapides, les points de commutation, les pressions d'injection, ainsi que la qualité métallurgique, la composition chimique et la température de l'aluminium liquide.

Dans le processus de MMSP avec chambre froide, il est connu que l'air emprisonné provoque un modèle d'écoulement indésirable durant le remplissage. Deux régions sont les plus exposées à l'emprisonnement d'air (gaz) durant le remplissage. Le premier est dans la cavité du moule, et l'autre dans le cylindre d'injection. L'écoulement du métal liquide dans la cavité du moule dépend de la forme de la pièce. L'écoulement du métal liquide dans le cylindre injection, dépend de l'opération de MMSP c'est à dire principalement la vitesse du piston.

Le présent travail porte sur la simulation numérique, en utilisant le code FLUENT, des champs dynamique et thermique durant le moulage par injection du métal à l'état liquide avec surface libre afin de prévoir l'élimination de la totalité des pores.

Le travail a été enchaîné de la manière suivante :

•Une introduction générale présentant le but du travail et montrant l'intérêt de l'étude numérique du processus MMSP avec chambre froide.

Pour cela nous avons subdivisé ce mémoire comme suit : Les trois premiers chapitres de ce manuscrit sont consacrés à une synthèse bibliographique.

Le chapitre I présente une généralité sur les procédés de moulage, moulage magnétique, défauts de moulage On commence par une définition de ces moulages et les techniques de moulage et l'effet du champ magnétique.

Le chapitre II : présente formulation mathématique (modélisation de l'écoulement de fluide, modélisation thermique modèle de turbulence k- ε , la méthode volume-of-fluide

[VOF])

le chapitre III, on parle les méthodes de discrétisation, calcul d'interfaces, simulation numérique en fenderie.

Le dernier chapitre, chapitre **IV :** Il est consacré à la présentation et la discussion des résultats. Est port e sur l'étude de Transfer de chaleur et de l'écoulement du fluide e est évalué par un modèle CFD appliqué sur le code ANSYS/ FLOTRAN avec comparaison de la présence ou l'absence de champ magnétique, Il contient plusieurs points (identification et validation de la simulation numérique, influence sur champ magnétique, interprétation de résultat de simulation, comparaison entre les deux expériences.

CHAPITRE I

GENERALITES

I.1 Introduction

La fonderie consiste à couler un métal ou un alliage en fusion dans un moule pour obtenir, après solidification, une pièce dont les formes reproduisent celles du moule. Du fait qu'elles mettent en forme le métal liquide, les industries de la fonderie doivent maîtriser deux technologies essentielles : la fusion des métaux et alliages, et le moulage.

L'objectif de ce chapitre est de présenter la problématique industrielle liée à la formation des défauts de remplissage, ainsi que une synthèse sur le principe de la fabrication de pièces de fonderie. Après une présentation exhaustive des différences techniques de moulage nous avons défini plus précisément les défauts de moulage, avec quelques remèdes possibles.

I.2 le Moulage :

Le moulage ou fonderie est un ensemble de procédés qui permet de réaliser des pièces Métalliques brutes. Le moulage proprement dit consiste à réaliser des pièces brutes par coulée Du métal en fusion dans un moule en sable ou en métal (représentant l'empreinte de la pièce à Obtenir), le métal en se solidifiant, reproduit les contours et dimensions de l'empreinte du moule.[1]

I.2.1. Généralités sur le moulage :

Les organes et pièce constituants les machines et appareils proviennent de sources diverses de fabrication tels que forgeage, usinage, estampage, fonderie etc.

La technique de fonderie est la plus souvent utilisée car elle est non seulement économique mais :

- Elle permet de produire des pièces de formes complexes (difficilement réalisables par usinage ou par d'autres procédés).
- Obtention de pièces est identique.
- Obtention de pièces massives telles que bâtis, volants etc.

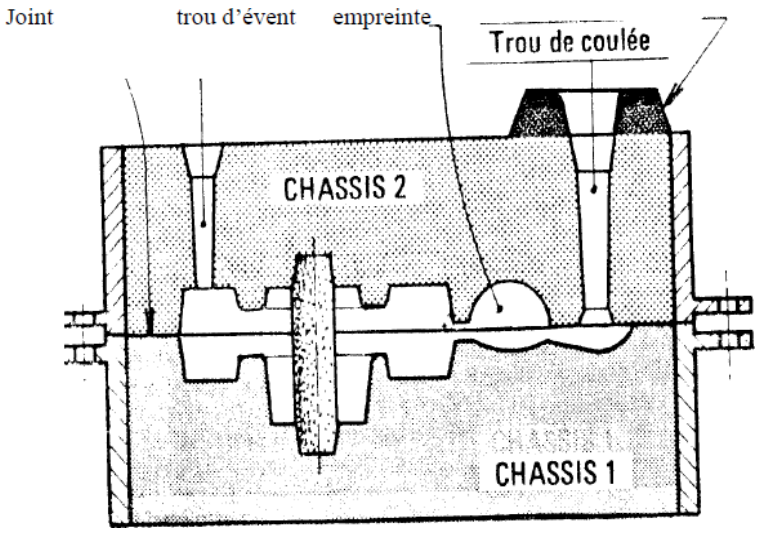


Figure. I.1 : représenté d'un moule complet**.**

Le procédé peut-être décrit d'une manière générale en plusieurs étapes (figure 2) :

- La conception des plans.
- La fabrication des moules.
- La préparation et la conduite de la fusion du métal ou de l'alliage.
- La coulée, c'est-à-dire le versement du métal liquide dans le moule.
- Le démoulage.
- Et enfin, le nettoyage, la finition et l'inspection finale de la pièce. [2]

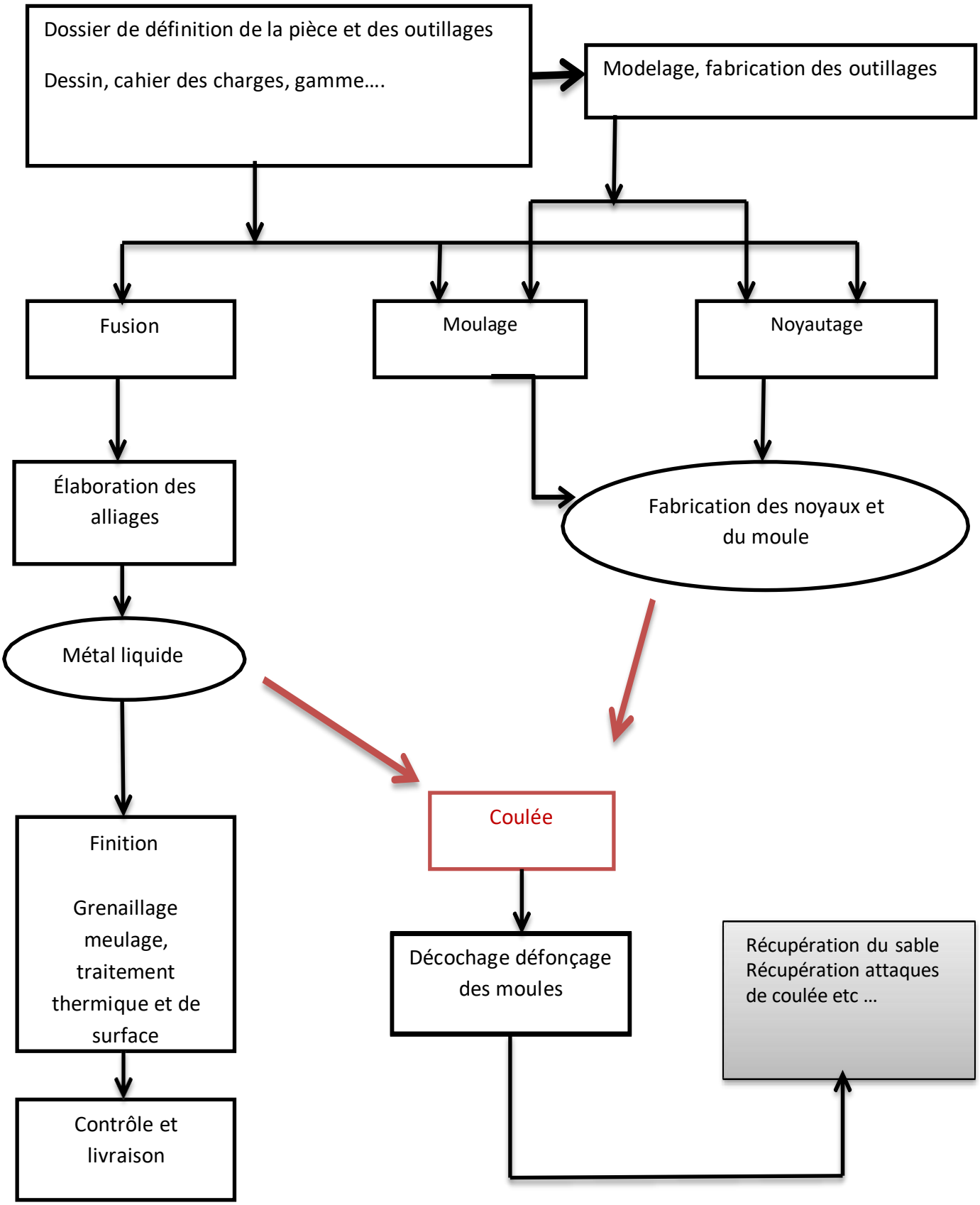


Figure.I.2 : Principe de la fabrication de pièces de fonderie. [2]

On distingue deux types de moules : moule non permanent, et moule permanent

Moulage en moule non permanent : Les moules destructibles sont fabriqués en sable ou en céramique.

Après la coulée et la solidification du métal, ils doivent être désagrégés pour libérer les pièces. Le moulage en sable est utilisé pour tous les alliages, mais particulièrement pour la réalisation de pièces en fontes ou en acier. Le procédé permet de réaliser des formes complexes de pièces unitaires ou de faibles séries pour un outillage de faible coût. [3]

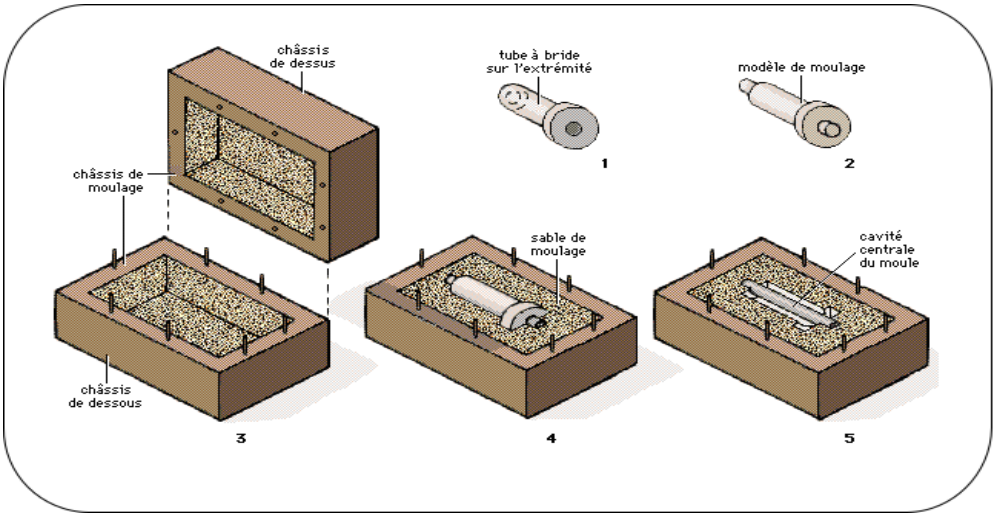


Fig. (I.3): Principe de moulage en moule non permanent

Moulage en moule permanent : Les moules permanents sont métalliques, réutilisables plusieurs centaines de milliers de fois. Ils permettent de couler des alliages légers (aluminium, magnésium, zinc). Le procédé permet de réaliser des formes complexes, le coût de l'outillage est élevé, il est adapté pour la production en grande série. [3]

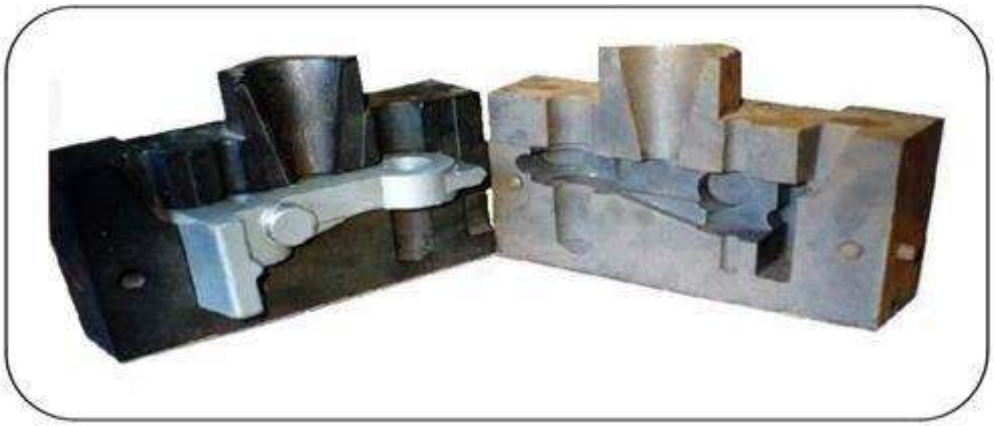


Fig. (I. 4): exemple sur moulage en moule permanent [3]

I.2.3. Possibilité et avantage des moulages :

- Permet de réaliser des pièces de forme complexe ;
- Permet de réaliser des formes intérieur et extérieur ;
- Suivent les procédés de moulage on peut obtenir des pièces dont les dimensionssont plus au moins proches de la pièce finie ;
- On peut réaliser des pièces de très dimension ;
- Certaines procédés de moulage permettent une production eu très grand série.

I.2.4. Les inconvénients du moulage :

Les inconvénients dépendent des procèdes de moulage.

- Limitation de propriété mécanique des pièces (matériaux) ;
- Faible précision dimensionnelles et mauvaise état des surface certaines procédé (Exemple : moulage au sable) ;
- Problème environnement aux (fumées).

I.2.5. Classification des procédés de moulage :

Dans la spécialisation de la fonderie, on distingue pratiquement les fonderies suivantes :

Types de moulage			
Moulage à modèle permanent : **1.** Sables restant plastiques. **2.** Sables durcissement thermique. **3.** Sables durcissement chimique. ▪ Autodurcissants. ▪ Par gazage. **4.** Sables durcissement physique. ▪ V process. ▪ Congélation.	**Moulage à modèles perdus :** **1.** Polystyrène expansé. **2.** Cire perdue **3.** Mercure congelé.	**Moulage en moules métallique :** **1.** Coquille gravité. **2.** Coquille basse pression. **3.** Moulage sous pression. **4.** Moulage par forgeage liquide.	**Procédés spéciaux :** **1.** Moulage avec refroidisseurs . **2.** Moulage avec inserts. **3.** Moulage pièces bimétal. **4.** Moulage par centrifugation. **5.** Moulage en coulée continue. **6.** Moulage à empreintes souples.

TAB.I.1 : classification les procédés de la fonderie

I.3. Les techniques de moulage :

I.3.1. Moulage en sable :

Le matériau est coulé dans un moule en sable. Le moule sera détruit après la fabrication de chaque pièce, Il faut donc refaire un moule pour chaque pièce.

Le moule est fabriqué en au moins deux parties. Chaque partie ayant une empreinte donnant la moitié des formes de la pièce. Pour chaque partie du moule on utilise donc un modèle (en métal, bois ou autre matériau) quienfoncé dans le sable va laissé sont empreinte dans la Partie du moule. Le modèle est ensuite extrait du moule Avant que les deux parties du moule soient assemblées.

Lorsque la pièce à des formes intérieures qui Empêche toutes extraction du modèle, on insère entre les deux parties du moule un noyau en sable qui devra être maintenu dans le moule, puis détruit après démoulage de
la pièce.

Ce noyau est donc fabriqué de la même manière que chacune des parties du moule en tassant du sable dans un modèle en deux parties ayant les formes de la pièce. [4]

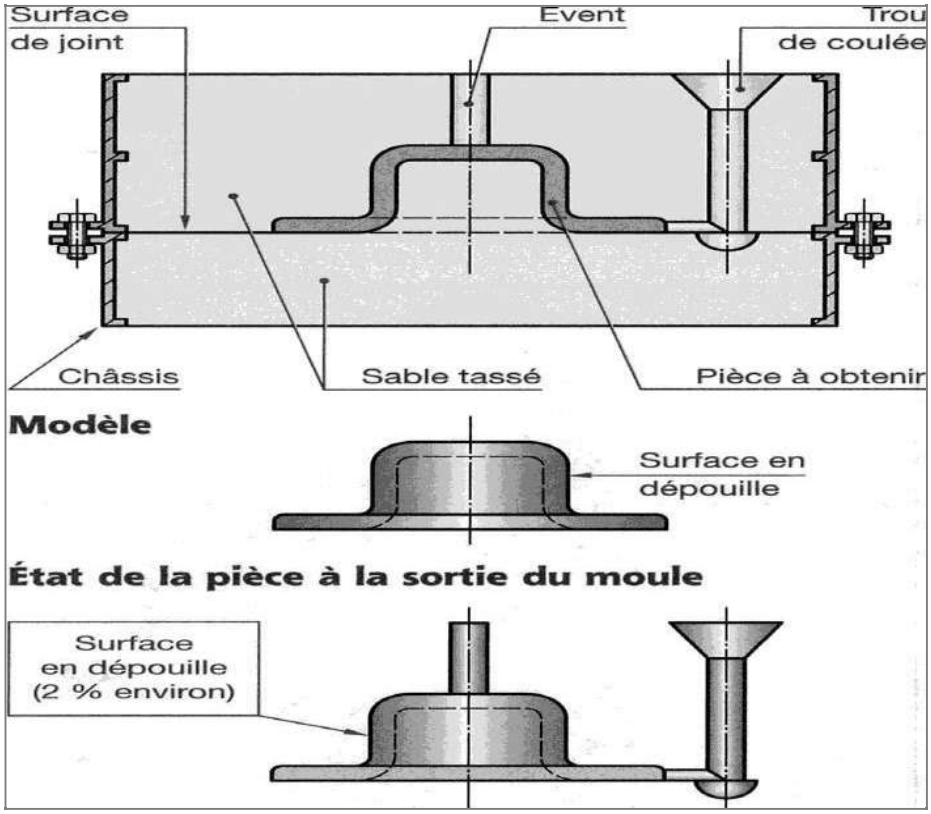


Figure (I.5) : présenté le moulage en sable

I.3.1.1. Avantages du procédé :

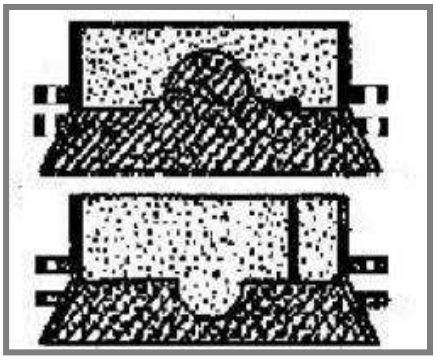
- Possibilité de mouler des matériaux dont le point de fusion est élevé (acier, fonte).
- Possibilité de mouler des pièces de (très) grande taille (Moulage de carters de machines)
- Procédé rentable pour les petites et moyennes séries (quelques dizaines à quelques milliers de pièces)

I.3.1.2. Inconvénients du procédé :

- ✓ Surfaces obtenues peu précises (± 0,5 mm) Nécessite un usinage des surfaces fonctionnelles
- ✓ Procédé peu rentable pour les grandes séries. [2]

I.3.2. Moulage mécanique

Afin de pouvoir effectuer le moulage mécaniquement, de nombreux types de machines ont été crées pour réaliser le serrage et le démoulage. Le modèle est collé à une plaque matérialisant la surface de joint du moule, l'ensemble constitue une plaque modèle, qui peut être en bois, en plâtre ou métallique. Deux plaques modèles sont généralement nécessaires pour exécuter un moule (figure 06)



Figure(I.6): Plaque modèle double [5]

I.3.2.1 Par pression : descente d'un piston ou montée de la table (figure07) ;

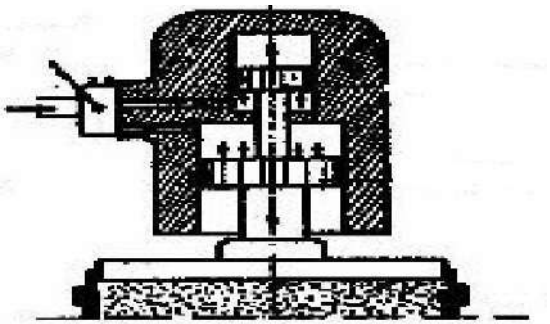


Figure (I.7) : Moulage par pression [5]

I.3.2.2. Par secousses : la table soulevée retombe brusquement, le sable est tassé par inertie (figure 08)

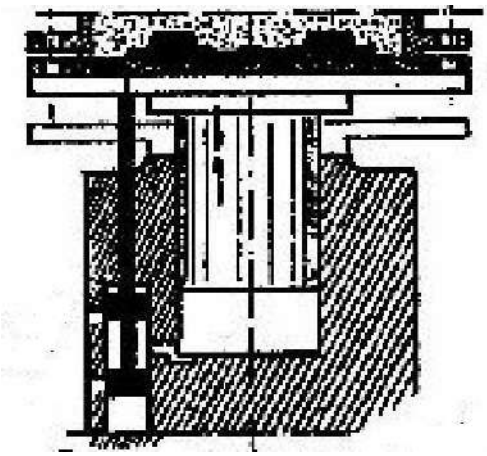


Figure (I.8) : Serrage par secousses [5]

I.3.2.3. Par projection : le sable est projeté violemment dans le châssis par une palette tournant à grande vitesse (figure 09)

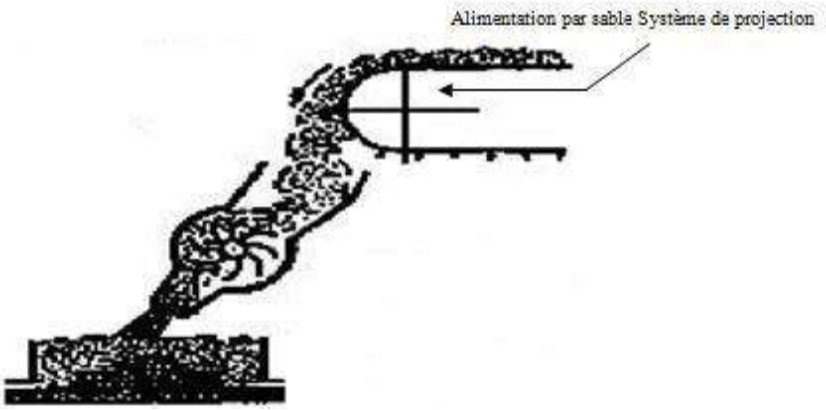


Figure (I.9) : Système de projection [5]

I.3.2.4. Par secousses et par pression :

Ce mode de serrage très régulier est le plus employé en fonderie moderne. Les différentes machines utilisent comme agent moteur la force humaine, l'eau sous pression et surtout l'air comprimé. Le démoulage est obtenu par soulèvement du châssis à l'aide d'un piston de démoulage (figure 10).

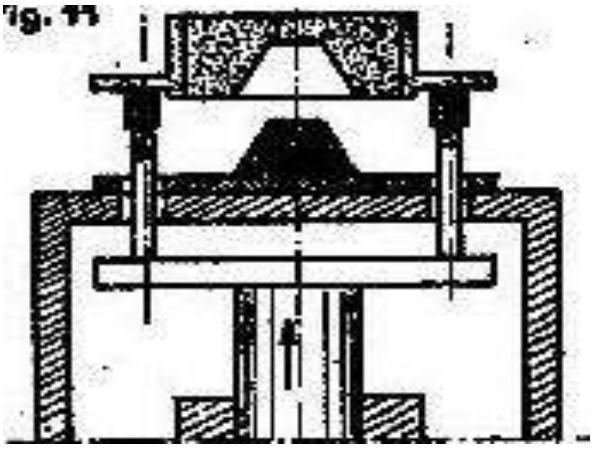


Figure (I.10) : Système d'aide au démontage [5]

I.3.3. Moulage par modèle perdu

I.3.3.1. Procédé par modèle gazéifiable

Le modèle est fabriqué en polystyrène expansé ou d'autres matériaux équivalents dont la masse volumique dans cet état est généralement comprise entre 16 et 28 g/L.

Les principaux intérêts de ce procédé sont l'utilisation d'un sable siliceux sans liant et la suppression du noyautage.

Par ailleurs, les pièces ainsi fabriquées ne comportent pas de bavures.

Les cavités que peut comporter une pièce sont conformées sans avoir recours à des noyaux, ce qui prédestine ce procédé à la fabrication économique de pièces très complexes, comportant parfois des formes intérieures non réalisables avec des noyaux en procédé des classiques. Ceci permet en particulier d'optimiser l'échange thermique dans certaines culasses très complexes :

- Culasses de moteurs d'automobiles ;
- Carters cylindres et culasses de moteurs hors-bord ;
- Collecteurs d'admission ;
- Réchauffeurs de gazole ;
- Echangeurs thermiques, etc.

Des progrès importants ont été réalisés dans la fabrication des modèles avec l'utilisation du polystyrène, mieux adaptée aux impératifs du moulage. La technologie de fabrication des modèles permet d'obtenir des états de surface conformes aux exigences de l'industrie automobile. Les enduits ont également fait d'énormes progrès, ce qui permet d'éviter des défauts, tels que les métallisations (abreuvage) et la présence d'inclusions formées de résidus carbonés. A cet égard, l'enduit a le rôle clé de réguler l'échappement des résidus gazeux du polystyrène et d'absorber les résidus liquides par « effet buvard ». La qualité des enduites joue un rôle essentiel pour la robustesse du procédé. Les modèles, lorsqu'ils sont constitués de plusieurs parties, sont assemblés par collage avec des cires spéciales dites « hot melt » qui évitent les dégagements gazeux et assurent une bonne continuité des cordons de collage.

Ce procédé est similaire à la coulée au sable avec des vitesses de refroidissement du même ordre de grandeur voire légèrement plus faibles. De ce fait, et en particulier dans zones de forte épaisseur, se manifeste une microporosité liée au gazage (et parfois combinée à de la micro retassure). Cette microporosité-combinée à la structure grossière résultant de la solidification lente- affecte notablement les caractéristiques mécaniques, en particulier l'allongement et la résistance à la fatigue. [6]

I.3.3.2. **Principe de fonctionnement du procédé par modèle gazéifiable** (figure 11) :

- Fabrication du modèle par expansion de billes de polystyrène dans un outillage de précision par de la vapeur de eau.
- Assemblage en grappes par collage, chauffage superficiel ou emboîtage.
- Enduction au trempé de la grappe dans une couches, cette dernière doit recouvrir intégralement le modèles y compris les cavités.
- Séchage de l'enduit à l'air pulsé.
- Mise en place de la grappe dans une cuve contenant un lit de sable, remplissage en pluie pour ne pas endommager la grappe, ni la déformer. Une vibration de faible amplitude permet au sable de bien remplir tous les orifices de la pièce.
- Coulée de l'alliage liquide sur le modèle. Celui-ci est progressivement détruit par décomposition en phase liquide puis gazeuse.
- Mise en pression de la cuve selon une rampe de montée en pression bien définie. Seule cette séquence est spécifique au procédé Castyral® et nécessite une unité de mise en pression d'air et des cuves spéciales équipées de couvercles à fermeture rapide.
- Extraction de la grappe solidifiée et trempée dans l'eau pour éliminer l'enduit adhérant à la pièce.

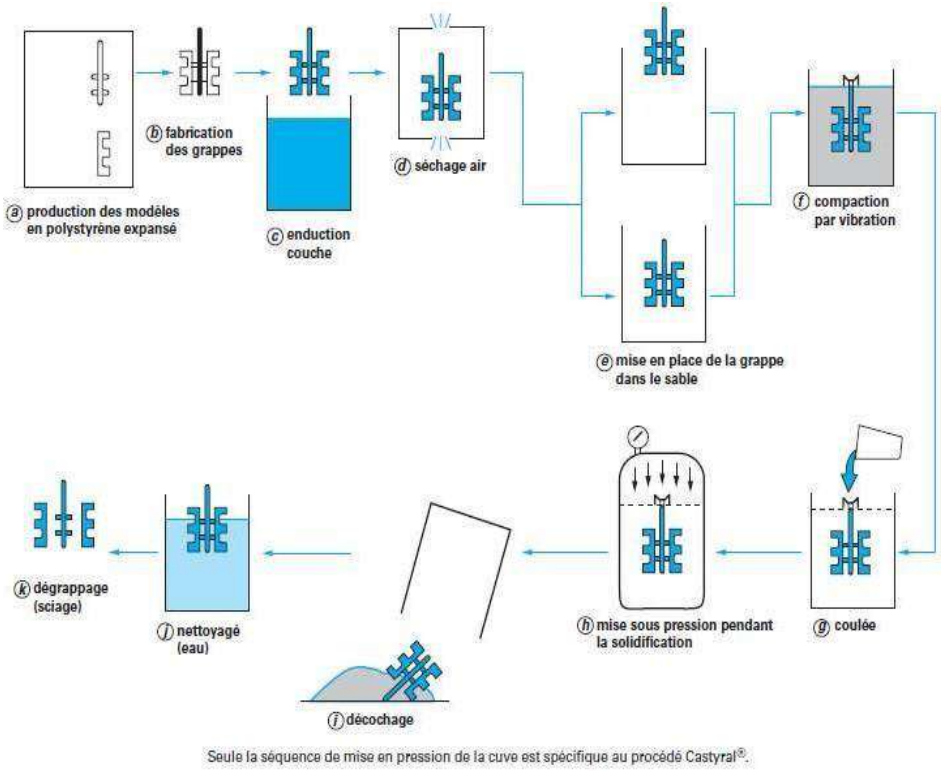


Figure.I.11 : séquences du procédé de moulage par modèle gazéifiable. [6]

I.3.3.3. Moulage à la cire perdue

Il existe deux variantes de ce procédé :

- Moule plâtre ou moule bloc.
- Moules en carapace (procédé à la silice colloïdale ou au silicate d'éthyle).

Ce procédé est utilisé pour des pièces ou sont exigés un excellent étant de surface et une grande précision dimensionnelle. L'épaisseur minimale peut atteindre 0.5 mm sur petites surfaces. Ce procédé doit être utilisé pour des pièces à haute valeur de refroidissement à la porosité. Il existe des variantes permettant d'éviter ces inconvénients. [6]

I.3.4. Moulage en moule métalliques :

I.3.4.1. Différents procédés de moulage en coquille :

Ces procédés sont classés et différenciés suivent le mode de mise en œuvre du métal liquide :

- Moulage en coquille par gravité : la coulée se fait par gravité, directement dans le gode de coulée de la coquille.
- Moulage en coquille basse pression : le métal est injecté dans l'empreinte

grâce la pression d'un gaz sur le bain liquide et introduit dans le moule par l'intermédiaire d'une buse d'injection.

- Moulage sous pression : le métal est injecté sous forte pression dans le moule par l'intermédiaire d'un piston agissant sur le métal liquide versé dans un conteneur.
- Moulage sous très haute pression (100 à150 MPa) forgeage liquide.
- Moulage en coquille centrifugée : il est utilisé principalement pour la fabrication de pièces cylindriques creuses. [4]

I.3.4.2. Moulage en coquille par gravité

Moulage par gravité on vers par gravité le métal fondu dans un moule en métal jusqu'à ce qu'il se solidifie. On ouvre alors le moule et on en retire la pièce. Le moule est généralement fait en font de fer mais on peut également utiliser des aciers à bas taux de carbone et des aciers pour moules. Les moules peuvent être de construction relativement

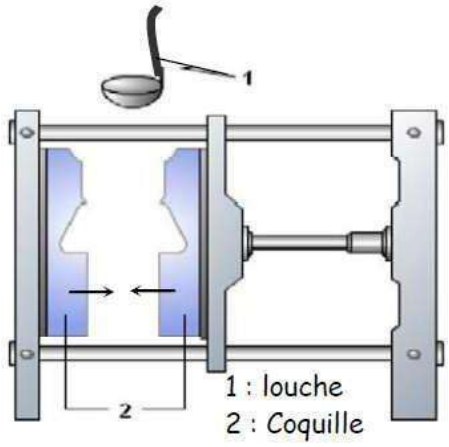


Figure.I.12 : moulage en coquille par gravité [7]

I.3.4.3. Moulage en coquille basse pression :

Le remplissage du moule se fait par mise en pression du four installé sous la coquille, à une vitesse lente pour éviter les turbulences. Une légère surpression est appliquée en fin de remplissage. Ce procédé est principalement utilisé dans l'industrie automobile pour la réalisation de pièces de sécurité. [9]

I.3.4.4. Moulage sous pression :

La fonderie sous pression est destinée à réaliser des pièces en grandes séries. Cette technologie consiste à injecter à grande vitesse le métal liquide dans un moule métallique on obtient ainsi un bon état de surface et on évite la maximum de reprise d'usinage.

Il existe l'emploi de machines spéciales à couler, le métal est injecté dans la

coquille sous l'action d'un piston (Figure.I.13). [8]

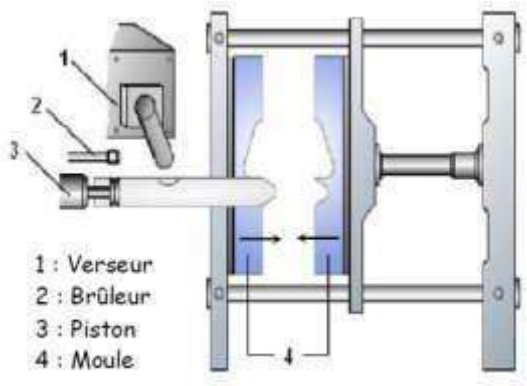


Figure.I.13 : Moulage en coquille sous pression. [8]

Les avantages :

- Grande précision dimensionnelle ;
- Très bon état surface ;
- Suppression de certains usinages ;
- Obtention de pièces légères ;
- Bonne caractéristiques mécaniques. [4]

Les inconvénients :

Le remplissage turbulent, par définition, conduit à des entraînements d'air et à la formation d'oxydes, qui créent des soufflures et des replis.

- Les pièces présentent des retassures à cœur malgré la pression appliquée. Les retassures sont des défauts de fonderie rencontrés lorsque le métal passe de l'état liquide à l'état solide.
- Les pièces ne peuvent pas être traitées thermiquement, ce qui limite les propriétés mécaniques des pièces.
- La faible liberté de formes due aux difficultés d'utilisation de noyaux.
- Les pièces ne peuvent pas être assemblées par soudage. [8]

I.3.5. Moulage par forgeage liquide :

Le forgeage (figure 10) s'applique aux alliages légers et se distingue des autres procédés en moules métalliques par:

- Un remplissage très calme de l'empreinte

- Une solidification sous une pression très élevée (100 MPa et jusqu'à 150 MPa), ce qui Confère aux pièces fabriquées de très bonnes caractéristiques mécaniques grâce à une structure très fine et à l'absence de porosités et permettra également de réaliser des composites à matrice métallique renforcée de fibres céramiques.

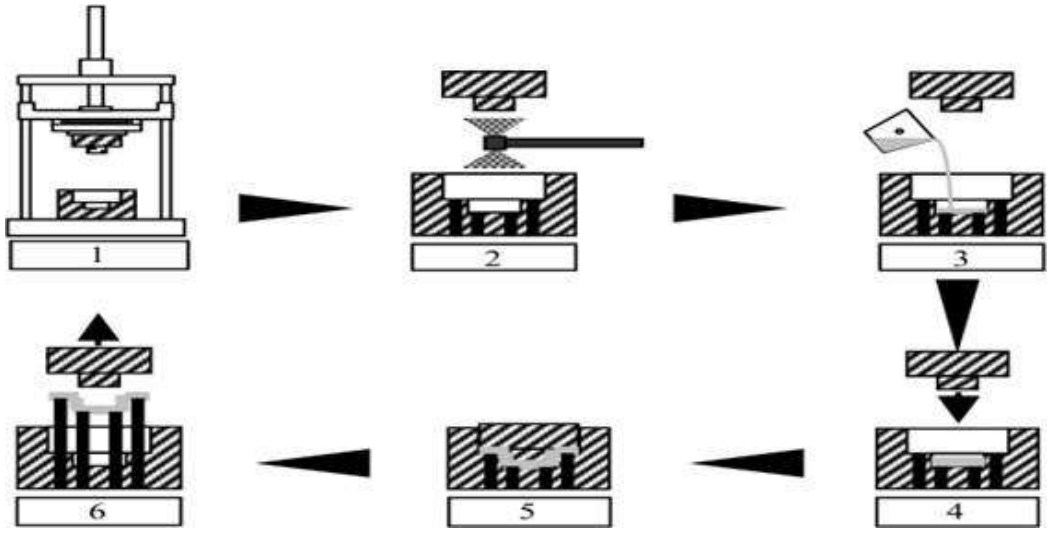


Figure (I.14) : Moulage par forgeage liquide

1. presse hydraulique ouverte
2. poteyage du moule
3. verse métal
4. fermeture presse
5. solidification sous pression
6. ouverture puis éjection de la pièce

II existe deux variantes:

- Le squeeze-casting indirect, qui utilise des moules semblables à ceux de la fonderie sous Pression; le remplissage de l'empreinte se fait à faible vitesse, de bas en haut, le piston d'injection servant ensuite à l'application de la pression de solidification.
- Le squeeze-casting direct, ou forgeage liquide, qui utilise des outillages semblables à des Matrices de forge; le métal liquide est dosé au préalable, puis versé directement dans la matrice. Une pression très élevée est ensuite appliquée par le poinçon supérieur sur toute la surface libre du métal pendant la durée de la solidification et du refroidissement.

I.3.6. Moulage avec refroidisseurs :

Les refroidisseurs sont des masses métalliques, de dimensions réduites, dont le rôle est decréer localement des vitesses de refroidissement de l'alliage coulé supérieures à celles des sables de moulage ou à celles du refroidissement normal de la pièce dans son moule pour:

- Orienter la solidification de la pièce et réduire ainsi localement les risques de retassures et de criques
- Donner une structure particulière à l'alliage coulé à l'endroit du refroidisseur

Ceux-ci peuvent être des refroidisseurs de surface, une de leurs faces sert alors de surface Moulante dans l'empreinte, ou être des refroidisseurs internes noyés dans la pièce.

I.3.7. Moulage magnétique:

Le moulage est un processus de fabrication, utilisé directement ou indirectement dans presque tous les secteurs. Il s'agit d'un processus de fabrication primaire qui influe sur les propriétés du produit résultant.

À cette époque, il existe une demande d'innovation de procédés permettant de réduire les délais, les coûts de production sans compromettre la qualité des produits et de réduire les effets néfastes sur l'environnement.

La coulée en moule magnétique est un procédé innovant qui présente un grand potentiel pour remplacer les méthodes de coulée conventionnelles en raison des divers avantages qui lui sont associés.

La configuration de la MMC comprend l'enroulement du fil de cuivre afin qu'il se comporte comme un solénoïde à cavité creuse dans lequel le processus de moulage doit être exécuté. La configuration a été préparée avec un fil de cuivre de calibre 19 et l'enroulement est effectué jusqu'à ce que le champ magnétique requis soit créé.

La configuration de la préparation et les essais montrent qu'il est possible de créer une configuration similaire à grande échelle, de sorte que MMC puisse être utilisée au niveau industriel pour exploiter ses avantages de réduction des coûts, de réduction des délais, de

l'effet réduit sur l'environnement et de la comptabilisation de propriétés améliorées. au produit résultant.

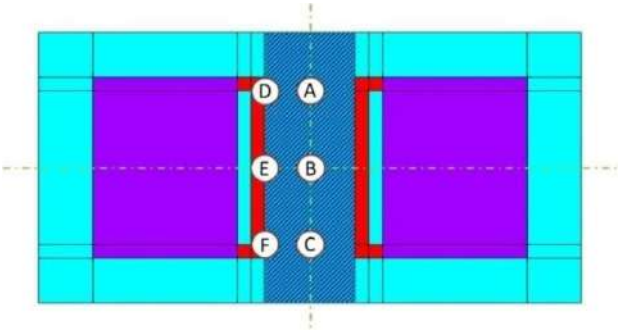


Figure (I.15) : Modèle CAE de la conception finale du moule magnétique.

I.3.7. 1. Configuration expérimentale :

• Dimensions du moule:

Le cylindre creux de diamètre = 200 mm et de hauteur = 250 mm est fabriqué en enroulant un fil de cuivre sur une âme creuse en acier. L'acier est utilisé comme noyau afin de confiner le champ magnétique à l'intérieur du solénoïde, car l'acier a une perméabilité magnétique élevée.

• Un fil de cuivre de calibre 19 est utilisé pour maintenir le courant pendant la période d'expérience requise sans dommage dû au chauffage.

• Conteneur en fer - Il est constitué d'une feuille de fer pur de 1 mm d'épaisseur laminée en forme de cylindre de diamètre extérieur de 180 mm et de hauteur de 250 mm et fermée à une extrémité.

• Alimentation - L'alimentation en courant continu constant est fournie à l'aide d'un autotransformateur monophasé 0-250 V et d'un redresseur en pont de 230 V et 10 A est utilisé.

• Le nombre de tours a été déterminé en vérifiant la valeur du champ magnétique à différentes valeurs de tour et l'enroulement a été arrêté lorsque la valeur de champ requise a été obtenue. Le capteur à effet Hall est utilisé pour la détection de champ magnétique produit à l'intérieur du moule.
Le moule est conçu pour produire un champ magnétique de 0-0,5 Tesla [9]

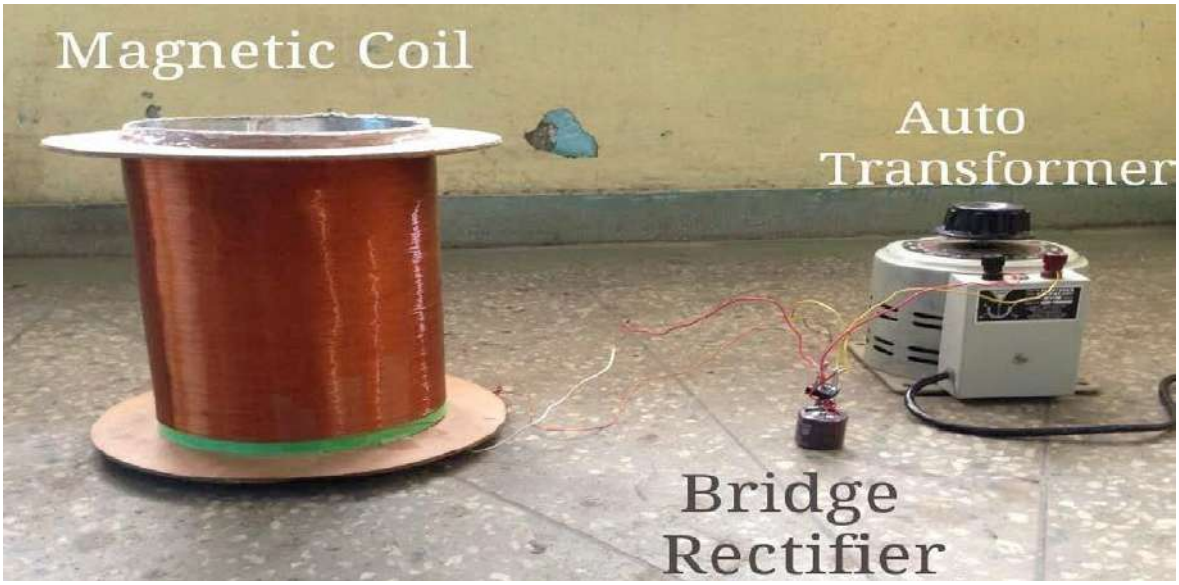


Figure (I.14) : Configuration fabriquée. [9]

I.3.7.2. Procédure expérimentale :

Initialement, les paramètres pour MMC sont définis. La première étape consiste à sélectionner un modèle de montage magnétique et à définir des paramètres tels que le calibre du fil de cuivre, l'intensité du champ requis, la taille des tirs en acier, la composition des tirs en acier, la taille des consommables motif en polystyrène et revêtement réfractaire sur sa surface. Les étapes suivantes sont suivies pour effectuer le moulage magnétique:

1. Préparation de l'installation magnétique:

Une boîte cylindrique creuse en aluminium est utilisée pour enrouler les bobines dessus. Du fil de cuivre de calibre 19 est utilisé. Une bobine de cuivre de 6,5 kg est utilisée pour l'enroulement. Une boîte en fer est insérée dans la boîte à moules pour former le noyau du champ magnétique.

Pour l'alimentation de la bobine de cuivre, un redresseur de puissance en série pour un autotransformateur est connecté. L'alimentation en courant alternatif est fournie à l'autotransformateur à travers lequel la tension est modifiée. La sortie de l'autotransformateur est connectée au redresseur de puissance, qui convertit le courant alternatif en courant continu, et cette alimentation en sortie continue est fournie aux bobines de cuivre.

2. Motif EPS et revêtement réfractaire:

La feuille EPS est découpée dans la forme souhaitée. Ce motif va se vaporiser pendant

le processus de coulée. Le revêtement réfractaire du modèle joue un rôle essentiel dans le CMM, il forme une barrière physique et thermique entre le modèle et le moule magnétique. Ce revêtement empêche la diffusion de la masse fondue dans le moule en acier (Pierre-marrie Geoffrey et. Al.).

L'argile réfractaire est utilisée pour le revêtement réfractaire du motif. Sa composition chimique est de 30% d'oxyde d'aluminium, 60% de silice et le reste est constitué de MgO,CaO et oxydes de fer. Il peut supporter une température de 1600 ° C. Le motif est plongé dans la boue à base d'eau d'argile réfractaire, qui est un revêtement réfractaire. Une épaisseur constante de suspension sur le motif est maintenue. On laisse ensuite le motif sécher à la température ambiante.

3. Formation du moule magnétique:

Les cartouches en acier sont placées dans la boîte à moules, puis le motif EPS est conservé au centre et les cartouches en acier continuent à couler.

Les grenailles d'acier sont coulées jusqu'au niveau du bassin verseur. Après le tassement du motif dans les grenailles d'acier environnantes, l'alimentation est activée et un champ magnétique est appliqué sur les grenailles d'acier.

Ces grenailles d'acier se lient les unes aux autres en raison de la force magnétique et forment ainsi un moule constitué de grenailles d'acier autour du motif. Une intensité de champ croissante, qui peut être augmentée en augmentant la tension, augmente la résistance du moule. La tension peut être augmentée en utilisant l'autotransformateur jusqu'à une certaine limite uniquement parce qu'une valeur de tension plus élevée peut entraîner la combustion des bobines.

4. Coulée:

L'aluminium utilisé dans diverses industries telles que l'automobile, les biens de consommation, la défense, la construction, etc. est fabriqué par MMC.

La fonte d'aluminium est préparée à l'aide d'un four. Cette masse fondue est ensuite versée dans un moule magnétique. Alors que le jet de EPS se vaporisait et que la masse fondue prenait la place de ce motif, après 8 min 30 s, le champ magnétique était désactivé en coupant l'alimentation en tension et le moule s'effondrait soudainement. Le moulage est ensuite sorti et laissé refroidir à température ambiante.

Le petit casting de MMC est préparé avec succès. [9]

I.3.7.3. Effet du champ magnétique sur l'orientation de la fibre pendant le processus de remplissage dans le moulage par injection :

Cette étude porte principalement sur l'analyse sur un champ magnétique formé dans la cavité d'un moule contenant un appareil magnétique. Les impacts de la sélection du matériau du noyau de la matrice et de la conception de l'espacement des lames sur la distribution des lignes de champ magnétique et la densité de flux magnétique sont étudiés. Et ensuite, le résultat de la simulation du champ magnétique sera couplé au champ d'écoulement du processus de remplissage dans le moulage par injection. De plus, les comportements d'orientation des fibres seront modifiés par le champ magnétique externe. Les résultats de ces analyses peuvent être résumés dans les points suivants:

• Sélection du matériau du bloc d'espacement: si le fer est choisi comme matériau pour le bloc d'espacement, il en résultera un effet de blindage réduisant considérablement le champ magnétique dans la cavité. Par conséquent, nous utilisons de l'aluminium ayant une perméabilité relative similaire à celle de l'air comme matériau pour le bloc d'espacement, de sorte que le flux magnétique puisse pénétrer dans la paroi du moule et affecter l'orientation de la fibre.

• Épaisseur du bloc d'espacement: la densité de flux magnétique maximale peut être trouvée au centre de la 5ème série du tableau 1. Toutefois, compte tenu de la résistance structurelle du noyau de la matrice, nous avons encore besoin d'un bloc d'espacement suffisamment épais pour supporter les aimants. Des blocs d'espacement en aluminium de 3 mm d'épaisseur ont été utilisés pour la conception du moule. Dans le même temps, une plaque de serrage en aluminium est également ajoutée pour protéger l'aimant permanent. La tendance de la simulation du flux magnétique correspond également à la mesure expérimentale.

• La figure 15 montre également un produit croisé plus important des lignes de champ magnétique dans la région centrale de la cavité et la direction d'écoulement du polymère fondu, ce qui générera un moment magnétique relativement plus grand et un impact plus important sur le retournement de la fibre.

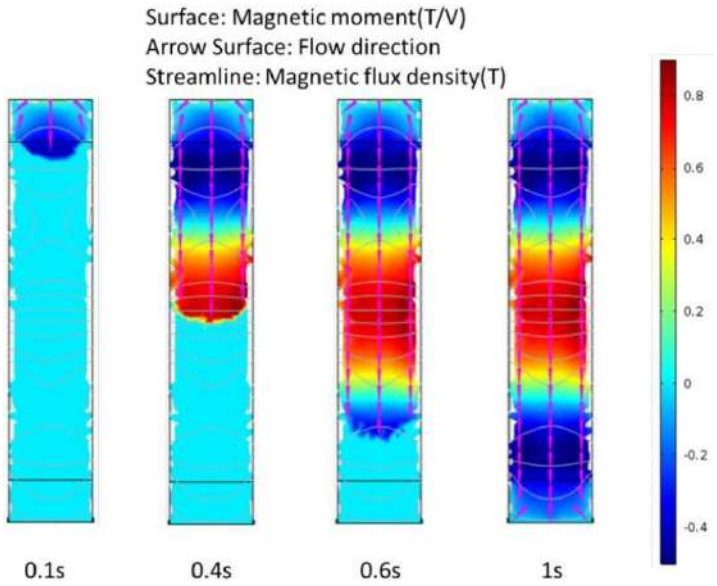


Figure (I.16) : Répartition du moment magnétique de la fibre pendant le processus de remplissage en raison du champ magnétique externe.

I.3.8. Matériaux ferromagnétiques :

Les matériaux ferromagnétiques sont les substances qui présentent un fort magnétisme dans la même direction du champ, lorsqu'un champ magnétique leur est appliqué. Premièrement, nous devons savoir ce qu'est un domaine. Il s'agit en réalité d'une toute petite zone de matériaux ferromagnétiques dont l'orientation générale du spin est due à l'effet de la mécanique quantique. Cet effet est vraiment une interaction d'échange. C'est; Lorsque nous considérons des électrons non appariés, ils interagissent entre deux atomes et s'alignent dans une région minuscule avec la direction du champ magnétique (Figure 15). Ce mécanisme du matériau ferromagnétique est le ferromagnétisme. Cela peut être défini comme certains matériaux (cobalt, gadolinium, fer, etc.) deviendront des aimants permanents avec l'utilisation du champ magnétique.

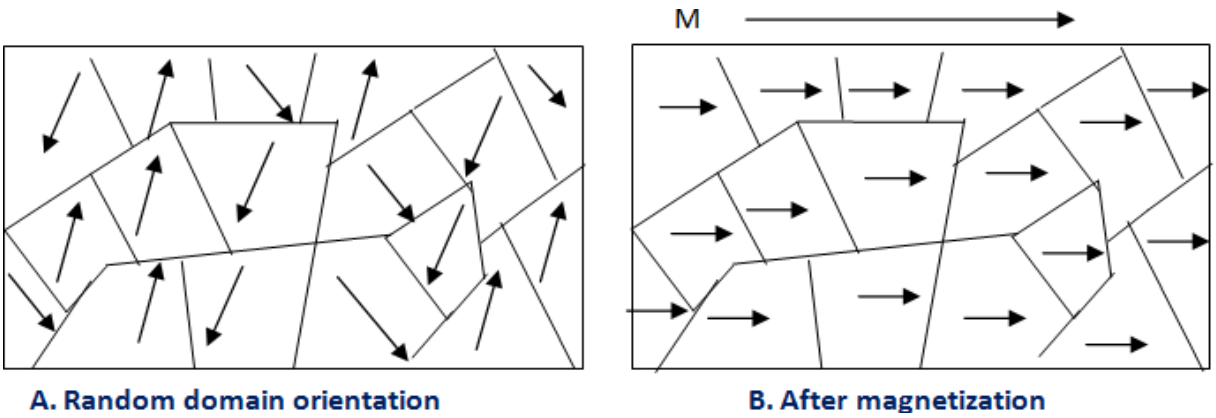


Figure (I.17) : la direction du champ magnétique

Le tableau ci-dessous rassemble une sélection de matériaux ferromagnétiques et ferrimagnétiques associés à la température au-delà de laquelle ils cessent d'exhiber des propriétés d'aimantation spontanée

Matériaux	T° de Curie		Susceptibilité magnétique χ_m
	K	°C	
Co	1 388	1 115	70
Fe α, aciers ferritiques et martensitiques	1 043	770	200
MnBi	630	357	
Ni	627	354	110
MnSb	587	314	
CrO_2	386	113	
MnAs	318	45	
Gd	292	19	
Dy	88	-185	
EuO	69	-204	

Figure (I.18) : matériaux ferromagnétiques et ferrimagnétiques associés à la température

I.3.8. 1. Propriétés des matériaux ferromagnétiques :

- Lorsqu'une tige de ce matériau est placée dans un champ magnétique, elle s'aligne rapidement dans la piste du champ.
- Il est fortement attiré par l'aimant.
- Le mécanisme de ferromagnétisme n'est pas présent dans les liquides et les gaz.
- L'intensité de l'aimantation (M), la susceptibilité magnétique (m), la perméabilité relative (μr) et la densité de flux magnétique (B) de ce matériau seront toujours importantes et positives.

$$\chi_m = \frac{M}{H}$$
$$\mu_r = 1 + \chi_m$$
$$B = \mu_0(H + M)$$

μ0 → Permittivité magnétique de l'espace libre.

H → Intensité du champ magnétique périphérique appliqué.

I.4. Le remplissage :

Le remplissage des moules par métal permet d'obtenir les formes les plus complexes (pleines ou creuses). On obtient alors, sans joints mécanique ni soudures, des pièces de tailles très variées, allant de moins d'un gramme jusqu'à plusieurs centaines de tonnes. La façon de couler n'est pas indifférent et cette opération demande un véritable tour de main, pour assures la continuité du remplissage et le débit de la coulée. L'engorgement de la coulée permet d'éviter l'entraînement d'air, ce qui provoquerait des soufflures dans la pièce et d'autres défauts de moulage.

I.5. Défauts de moulage :[10]

Un défaut de moulage est une irrégularité indésirable dans une pièce obtenue par moulage, et caractéristique du procédé d'obtention et du métal coulé. Certains défauts peuvent être réparés mais ils peuvent aussi mener au rebut de la pièce.

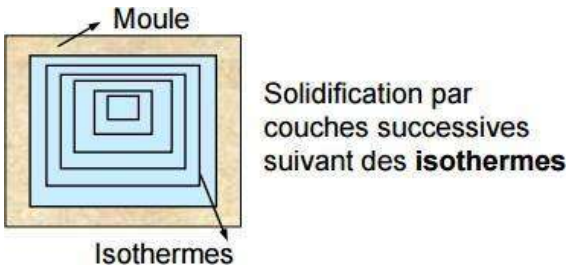
On peut distinguer cinq catégories de défauts, en se fondant sur leurs mécanismes de formation, à savoir :

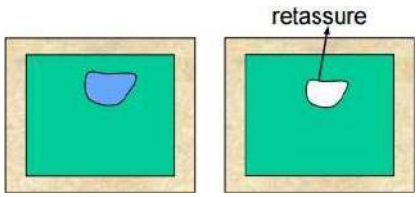
- les défauts formés pendant le retrait et qui sont liés à la solidification,
- les défauts dus aux gaz,
- les défauts liés au matériau avec lequel est réalisé le moule,
- les défauts formés pendant le remplissage du moule
- et les défauts d'élaboration.

L'apparition d'un défaut peut toutefois résulter de la combinaison de plusieurs phénomènes. Un correctif apporté au procédé peut éviter la formation d'un défaut et peut aussi créer un défaut d'un autre type.

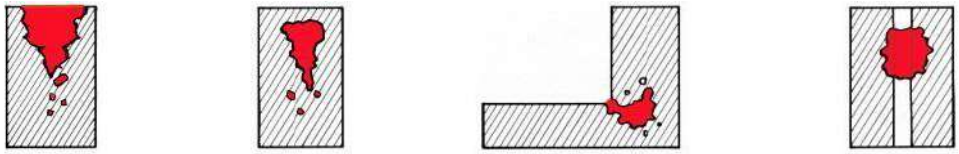
I.5.1. Défauts formés pendant le retrait de solidification :

Les retassures: Cavités ouvertes ou fermées à contours rugueux, localisées dans les dernières portions de métal solidifié. Elles sont dues aux contractions de volume subies par le métal liquide au cours de la solidification.

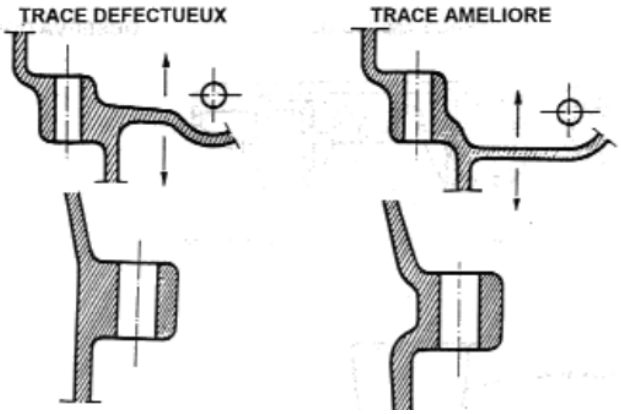




La forme et l'emplacement de la retassure dépendent des conditions de refroidissement.

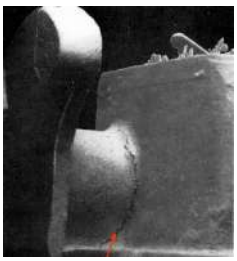


Ce défaut de retrait apparait lorsque le métal liquide ne parvient plus à compenser les contractions dues à la solidification du métal: on lutte contre sa formation par un dimensionnement et un positionnement correct de la (des) masselotte(s), qui va (vont) alimenter la pièce en métal liquide au cours du retrait. Si la (les) masselotte(s) est (sont) correctement conçue(s), elle(s) sera(ont) la (les) dernière(s) zone(s) solidifiée(s) et il est normal qu'elle(s) soit(ent) constellée(s) de défauts dus au retrait.



Les criques: Il s'agit d'une déchirure à chaud qui se produit au cours de la solidification en présence de contraintes mécaniques. Elle se développe généralement dans les parties chaudes.





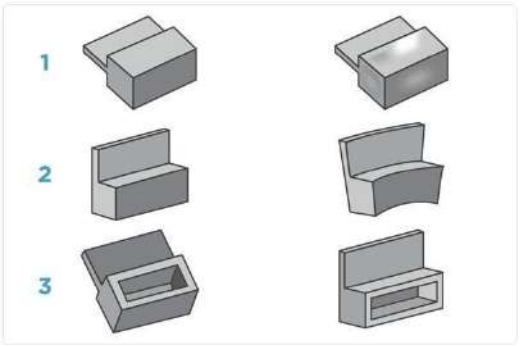


Les tapures: Il s'agit d'une déchirure qui se produit au cours du refroidissement du solide, en présence de contraintes mécaniques. Elle se développe généralement dans les parties encore chaudes et est due à une contraction thermique.



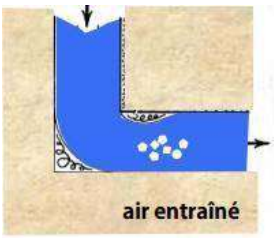
Les criques et les tapures sont dues à un tracé défectueux (différences d'épaisseur importantes, moulage trop ramifié) ou à l'état du moule (rigidité, déformation, rugosité, etc).

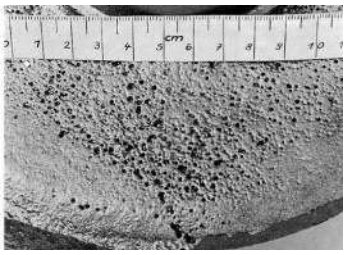
Le gauchissement: Une pièce conçue avec des parois trop minces pour le matériau cible risque fortement de se gondoler. Ce phénomène est désigné par le terme de « gauchissement » et peut être évité aisément en suivant les mêmes règles que pour la retassure, c'est-à-dire en respectant les indications générales d'épaisseur de paroi.

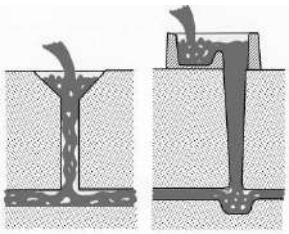


I.5.2. Défaut du aux gaz :

Les soufflures: Cavités à parois lisses crées et occupées par les gaz provenant de l'air entraîné pendant le remplissage et non évacué (mauvaise perméabilité du moule), de la réaction métal liquide/moule/poteyage, formées lors des réactions d'élaboration ou provenant du moule (humidité,...). Les soufflures apparaissent comme une piqure ou un cratère. Elles peuvent également rester piégées au sein du métal, affaiblissant alors dangereusement la pièce moulée. Pour limiter l'absorption de gaz par le métal en fusion, on peut traiter le métal avant la coulée, en le maintenant sous vide ou sous une atmosphère de gaz peu solubles comme l'argon. On limite aussi la solubilité des gaz en travaillant avec des surchauffes, en réduisant les turbulences au moment de la versée du métal dans le moule, en travaillant la forme des canaux d'alimentation et la vitesse de remplissage et en stockant le moule dans un endroit sec pour éviter les reprises en hydrogène.
Les méthodes de détection des soufflures utilisées actuellement sont la radiographie, le contrôle par ultrasons et la magnétoscopie.

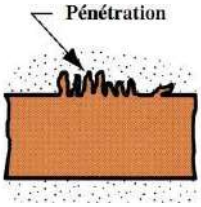






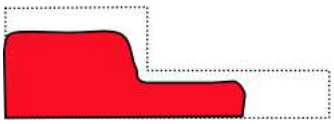
I.5.3. Défaut du au matériau avec lequel est réalisé le moule :

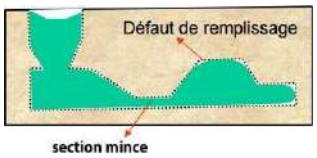
Pénétration: quand le métal coulé est très fluide, il peut pénétrer dans les porosités du sable. La surface de la pièce est un mélange de métal et de sable.



I.5.4. Défaut formé pendant le remplissage du moule :

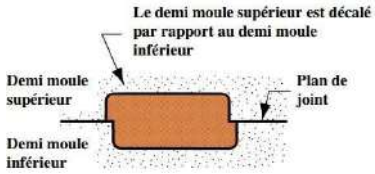
Défaut de remplissage: La pièce se solidifie avant de remplir complètement l'empreinte ou présente un manque de matière dans les parties supérieures du moulage. Ceci peut être due à une température de coulée basse, une fluidité et coulabilité insuffisantes ou un tracé incorrect de la pièce (sections trop faibles).





I.5.5. Défaut d'élaboration :

Défaut de joint: Défaut de mise en position des deux demi moules l'un par rapport al'autre.



I.6. Conclusion :

Présenté dans ce chapitre quelques généralités sur le procédé de remplissage des moules (le moulage). Et dans le cadre de ce travail nous avons défini quelques types de techniques utilisée dans cette opération et qui permettent de réaliser des pièces métalliques brutes. Aussi nous avons traité les défauts rencontrés le plus souvent en moulage.

La diminution ou l'élimination des défauts des pièces moulées est une question économique importante.

L'état de l'arts :

Nous étudions les problèmes liés au remplissage de modèles et ils sont nombreux et chaque scientifique a développé des solutions à ces problèmes à sa manière et parmi eux :

- **Leonardo B. Trindade, Jose Ernesto A. Nadalon, Andr e C. Contini et Rodrigo C. Barroso**

dans la région du moule d'un coulée continue billette ronde sous agitation électromagnétique de moule (M-EMS) , avec des outils de calcul de l'écoulement des fluides et des simulations électromagnétiques. Un modèle d'éléments finis est utilisé pour simuler l'agitateur électromagnétique dans le moule et calculer la force de Lorenz

L'agitation électromagnétique du moule (M-EMS) a été appliqué avec succès pour améliorer la qualité de l'acier. [11–12].

- **Shiou-Yueh Shih a, Shih-Chih Nian b, Ming-Shyan Huang a,⁎, Rong-Cheng Huang c, Chih-Hau Chen c:**

.

Le chauffage par induction électromagnétique a un taux de chauffage élevé Efficacité énergétique, et donc appliquée dans le travail des métaux Cette étude a conçu une bobine inductive de plaques de moule de formes géométriques inégales pour obtenir un chauffage uniforme et efficace. De plus, L'effet des matériaux de protection magnétique sur le chauffage par induction vérification. Les propriétés magnétiques et thermiques des matériaux
J'ai analysé en utilisant la simulation COMSOL Multiphysics [13]. Les bobines inductives sont principalement conçues pour chauffer une surface de moule avec un géométrie plane simple. Cependant, les bobines inductives avec non planaire les géométries doivent être prises en compte car les géométries non planes affectent répartition de la température pendant le chauffage. Peu d'études ont évalué l'effet de la géométrie cible sur les performances de chauffage et la sensibilité

.

- **J. DOUGLAS LAVERS, MEMBRE, IEEE :**

Des moules électromagnétiques sont actuellement utilisés dans le coulée continue de billettes et dalles en aluminium , Cet article a passé en revue les méthodes de prévision de la différence de pression et des distributions de force qui se produisent application de moule électromagnétique. En ce qui concerne les applications de retournement, les entraînements électromagnétiques à ondes mobiles sont souvent utilisés avec de l'électricité Fours à arc [14]

- **Keisuke Fujisaki :**

Pour un fonctionnement optimal du moule Agitation électromagnétique à travers le noyau Propriétés, j'ai fait de la magnétohydrodynamique 3D Agitation électromagnétique dans un moule de coulée continue Il a été développé il y a environ 20 ans, et il est devenu beaucoup plus Haute qualité de surface de dalle et de métal Caractéristiques [15].
Cependant, les utilisateurs ont demandé Un acier de haute qualité et des coûts réduits sont essentiels pour Métal de haute qualité en continu.

.

- **TAKAHASHI, Kenzo :**

  25 bobines électromagnétiques ont été appliquées à la fonderie La moisissure de sorte que l'induction se produit dans la masse fondue n'a pas encore durci. Principale Le but de cette induction est la dissolution et la dissolution Bâtiment. Cependant, comme la bobine électromagnétique est éliminée Position proche de la fonte à haute température, frais 30 bobines électromagnétiques et une maintenance gênante sont nécessaires
  De toute évidence, beaucoup d'énergie est nécessaire

J. Samir [1] M. Hattabi [1] J. Echaabi [1] A. Saouab [2] C.H. Park

-La présente étude porte sur la simulation du remplissage isotherme des moules en procédé RTM, en adoptant la méthode CV/FEM et VOF, avec prise en compte de la présence d'obstacles couplée à l'effet de la variation de l'épaisseur et des couches du renfort. Les codes développés ont pour objectif d'optimiser le positionnement des points d'injection, des évents et déterminer les pressions d'injection optimales pour minimiser les temps de cycle. Ces codes utilisent un mailleur propre à l'équipe permettant de discrétiser le domaine en éléments triangulaires non structurés avec possibilité de raffinement local et d'inclusion d'inserts

Ambrish Maurya1, Pradeep Kumar Jha2*

L'agitation électromagnétique (EMS) est devenue l'un des plus prometteurs technique pour modifier l'écoulement du fluide dans le moule [16], réduisant ensuite les inclusions, les trous de soufflage en améliorant les caractéristiques de solidification à l'intérieur du moule. Remuer à l'intérieur du moule favorise mélange d'acier liquide près du front de solidification et essaie de régénérer le liquide caractéristiques [17].

- **Yongjia Zhang[a], Xiang Gao[a], Xu Shen[a], Zhiwei Huang[b],Yajun Yin[a]*, Yongjia Zhang[a], Jianxin Zhou[a]**

Chen et al [18] ont proposé une méthode parallèle utilisant la technique OpenMP pour accélérer la simulation de monophasé processus de remplissage de moule. Wang et al [19] ont proposé un algorithme de recherche parallèle pour le processus de moulage sous pression à haute pression la simulation et les performances parallèles dépendent de la structure de la pièce moulée. Yan et al [20] ont appliqué le MPI-based algorithme parallèle à la simulation du processus de remplissage du moulage et évaluation de l'effet d'accélération. Les resultats

a indiqué que l'algorithme n'a que des performances instables et ne convient pas aux pièces moulées de grande taille, en particulier pour le modèle avec trop de grilles fines. Wang et al [21] ont proposé un algorithme de décomposition de domaine parallèle pour le moule de coulée sous pression la simulation de remplissage et la méthode de relaxation chaotique de Schwarz sont utilisées pour mieux décomposer le domaine de calcul et améliorer l'effec parallèle.

- **Roudouane Laouar et Olaf Wünsch** [22] présentent sur leur article une étude numérique de l'écoulement du métal fondu dans le cylindre d'injection d'une machine à MMSP horizontale durant le procédé d'injection. L'analyse de la vague du métal fondu créé par le mouvement du piston, Le modèle numérique utilisé, considère le problème comme bidimensionnel, est basé sur les équations de Navier-Stokes (la conservation de la masse et la conservation de la quantité de mouvement). Le suivi de l'évolution de la surface libre est assuré par la méthode des volumes finis, y compris la méthode VOF (volume of fluid). Vue le délassement du piston, la géométrie du domaine est variable et la résolution numérique utilise un maillage dynamique

Position de probléme :

- Nous étudions actuellement le remplissage de moules dans lesquels nous sommes confrontés au problème d'erreurs de remplissage dans les cavités que le liquide n'atteint pas afin d'obtenir un sans impuretés.

CHAPITRE II

Formulation mathématique

II.1.Introduction :

Ce chapitre traite des concepts de base du transfert de chaleur et de l'écoulement turbulent du fluide newtonien sans pression dans le système de variables, dans le but de fournir les principales équations régissant le double problème (dynamique et thermique).

II.1. Modélisation de l'écoulement des fluides:

Le mouvement de l'écoulement d'un fluide est modélise par les équations de Navier-Stokes qui permet de traiter les fluides classiques comme l'air, l'eau, l'huile ou aussi les métaux fondus. [23]

II.1.1. Equation de continuité :

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\delta(\rho v)}{\delta y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0 \qquad \textbf{(II.1)}$$

Ou dans une notation plus compacte

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\text{div }(\rho \mathbf{u})=0 \qquad \textbf{(II.2)}$$

Ainsi, l'incompressibilité d'un fluide $\frac{\partial \rho}{\partial t}=0$ se traduit par la relation suivante :

$$\text{div } u=0 \qquad \textbf{(II.3)}$$

II.1.2. Equation de quantité de mouvement :

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent. Il indique que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont Appliquées. Les équations de la quantité de mouvement (ou équations de Navier-Stokes) pour des fluides

newtoniens incompressibles en régime laminaire sont données par les expressions suivantes :

Suivant OX :

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial t}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\left(\frac{\partial \tau xx}{\partial x}+\frac{\partial \tau yx}{\partial y}+\frac{\partial \tau zx}{\partial z}\right)+(\rho+\rho_0)g_x \qquad \text{(II.4)}$$

Suivant OY :

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial t}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\left(\frac{\partial \tau xy}{\partial x}+\frac{\partial \tau yy}{\partial y}+\frac{\partial \tau zy}{\partial z}\right)+(j\times B)+(\rho+\rho_0)g_y$$

(II.5)

Suivant OZ :

$$\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial t}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\left(\frac{\partial \tau xz}{\partial x}+\frac{\partial \tau yz}{\partial y}+\frac{\partial \tau zz}{\partial z}\right)+(\rho+\rho_0)g_z \qquad \text{(II.6)}$$

Où les composants du tenseur des contraintes visqueuses sont donnés par :

$$\mu=\tau_{xy}=\mu\left[\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right] \qquad \text{(II.7)}$$

$$\tau_{yz}=\tau_{zy}=\mu\left[\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial x}\right] \qquad \text{(II.8)}$$

$$\tau_{xx}=\tau_{zx}=\mu\left[\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial x}\right] \qquad \text{(II.9)}$$

$$\tau_{xx}=\mu\left[2\frac{\partial u}{\partial x}\right];\tau_{yy}=\mu\left[2\frac{\partial v}{\partial y}\right];\tau_{zz}=\mu\left[2\frac{\partial w}{\partial z}\right] \qquad \text{(II.10)}$$

II.1.3. Equation de conservation d'énergie :

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la Thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie par :

$$\rho C_p\frac{DT}{Dt}+\rho C_p U.\nabla T=\text{div}(\lambda\,\text{grad}T)+\emptyset \qquad \text{(II.11)}$$

$$\emptyset=\tau_{xx}\frac{\partial u}{\partial x}+\tau_{yx}\frac{\partial u}{\partial y}+\tau_{zx}\frac{\partial u}{\partial z}+\tau_{xy}\frac{\partial v}{\partial x}+\tau_{yy}\frac{\partial v}{\partial y}+\tau_{zy}\frac{\partial v}{\partial y}+\tau_{xz}\frac{\partial w}{\partial x}+\tau_{yz}\frac{\partial w}{\partial x}+\tau_{zz}\frac{\partial w}{\partial z} \qquad \text{(II.12)}$$

Avec :

$\rho C_p\frac{DT}{Dt}$: La variation totale d'énergie

$\rho C_p U.\nabla T$: La variation d'énergie par convection

$\text{div}(\lambda\,\text{grad}T)$: La variation d'énergie par conduction

$\emptyset$: La dissipation irréversible due au frottement visqueux. [23]

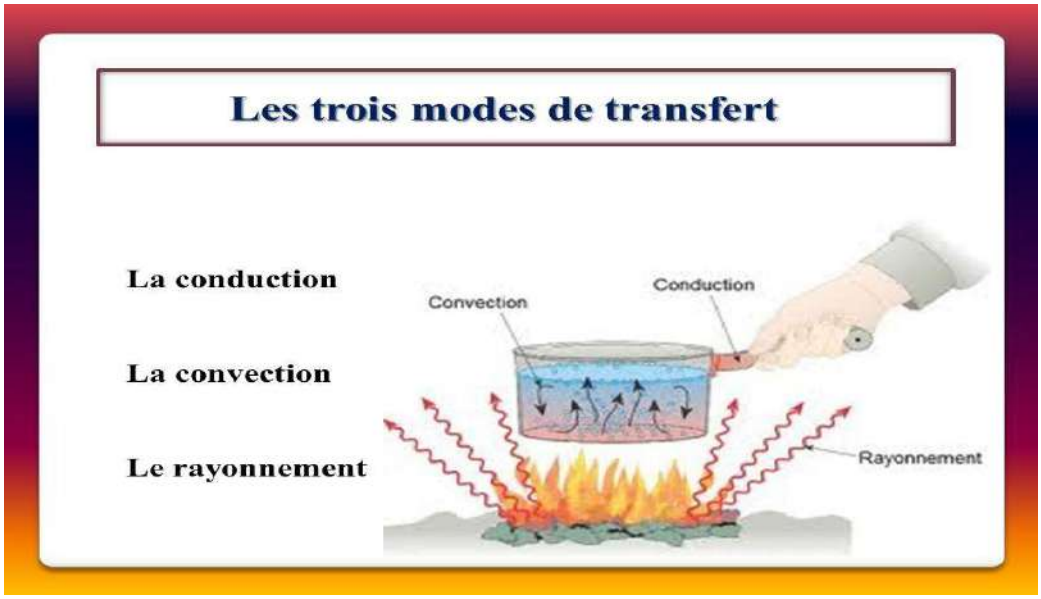
II.2. Modélisation thermique :

Un transfert thermique, appelé plus communément chaleur est l'un des modes d'échange d'énergie thermique entre deux systèmes. C'est une notion fondamentale de la thermodynamique. Contrairement au travail, la chaleur est le bilan de transferts d'énergie microscopiques et désordonnés., ne peut être ni mesurée ni observée directement, mais ses effets donnent lieu à des observations et des mesures.-

II.2.1-Différentes modes de transfert de chaleur :

La transmission de chaleur est la transmission d'énergie d'une zone à une autre sous l'influence de la différence de température, car nous avons que le flux de chaleur n'est pas seulement lié à une relation, mais concerne le mélange de différentes lois des matériaux indépendants. Le caloporteur fonctionne selon trois modes de transfert de chaleur.-

- La conduction.
- La convection.
- Le rayonnement



Figure(II.1) : Différent mode de transfert thermique

II.2.1.1. Transfert de chaleur par conduction :

La conduction thermique est un mode de transfert thermique provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu, ou entre deux milieux en contact, et se réalisant sans déplacement global de matière par opposition à la convection qui est un autre transfert thermique, Un transfert de chaleur constant est généré de la zone chaude vers la zone froide.-

II.2.1.1.1. Cas des gaz :

En un point M(x, y, z) du volume d'un gaz, la température T(x, y, z) est associée à l'énergie des molécules du gaz se trouvant à proximité de ce point. Les molécules d'un gaz sont animées d'un mouvement de translation aléatoire ou **brownienne,** d'un mouvement de vibration et de rotation interne. L'ensemble de ces mouvements forme le phénomène d'agitation thermique, auquel est associée une énergie proportionnelle à la température. Lors des collisions, les molécules voisines interagissent entre elles et s'échangent de l'énergie des molécules les plus énergétiques vers les molécules les moins énergétiques. Il s'effectue alors un transfert de chaleur. On parle de diffusion d'énergie.

II.2.1.1.2. Cas des liquides :

L'origine du transfert de chaleur est identique à celui des gaz. Néanmoins, les molécules sont plus proches et donc, les interactions sont plus fortes et fréquentes.

II.2.1.1.3. Cas des solides :

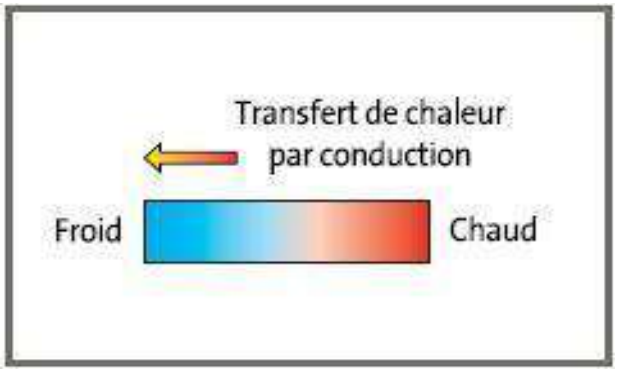
Dans ce cas, la conduction est attribuée à un transfert d'énergie sous la forme de vibrations du réseau cristallin. [24]

II.2.1.1.4. Loi de Fourier :

Fourier montre l'apport de chaleur au flux de liquide qui se produit des points chauds vers les endroits froids, dont les seules formes dans la matière se traduisent par des changements de température (effet ionique).

Considérons un milieu cylindrique homogène de section S et de longueur le (figure01), les deux faces du cylindre sont maintenues respectivement à la température T2 (source chaude) et T1. (Source froide). Il se produit un transfert d'énergie orienté de la source chaude vers la source froide.

Le milieu étant homogène, en régime permanent, la température se répartit de manière Uniforme.[9]



Figure(II.2) : Conduction thermique.[25]

En régime permanent, la loi de Fourier exprime la quantité de chaleur élémentaire dQ qui traverse en x une surface S d'épaisseur dxdurant le temps dt

$$\mathbf{dQ = -\lambda A \frac{dT}{dx} dt} \qquad \textbf{(II.13)}$$

- dQ : Énergie élémentaire en Joule

- λ : Conductivité thermique du matériau en $W.m^{-1}.K^{-1}$
- A : section en m^2
- dt : temps élémentaire en s
- $\frac{dT}{dx}$: Gradient de température en x en $K.m^{-1}$

II.2.1.2- Transfert de chaleur par convection :

Le phénomène de convection. La convection est un des trois modes de transfert de chaleur avec la conduction et le rayonnement. Le terme de convection fait référence aux transferts de chaleur se produisant entre une surface et un fluide en mouvement lorsque ceux-ci sont à des températures différentes. La quantité de chaleur échangée par unité de temps dépend de plusieurs paramètres :

- La différance de température entre la paroi et le fluide ;
- La vitesse du fluide ;
- La capacité thermique massique du fluide ;
- La surface d'échange ;
- L'état de surface du solide ;
- Sa dimension etc.…

Selon la mécanique qui génère le mouvement du fluide, on distingue :

- La convection naturelle
- La convection forcée

a) La convection naturelle :

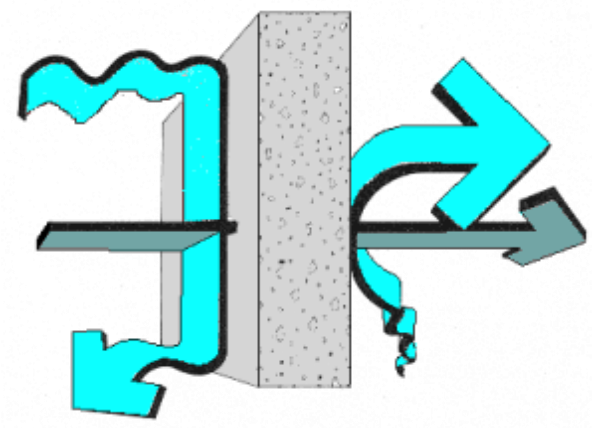
Le fluide est mis en mouvement sous le seul effet :

✓ Des déférences de masses volumiques résultant des différences de températures sur frontières ;

✓ D'un champ de forces extérieures.

b) La convection forcée :

Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur….) [4]



Figure(II.3) : Convection thermique.

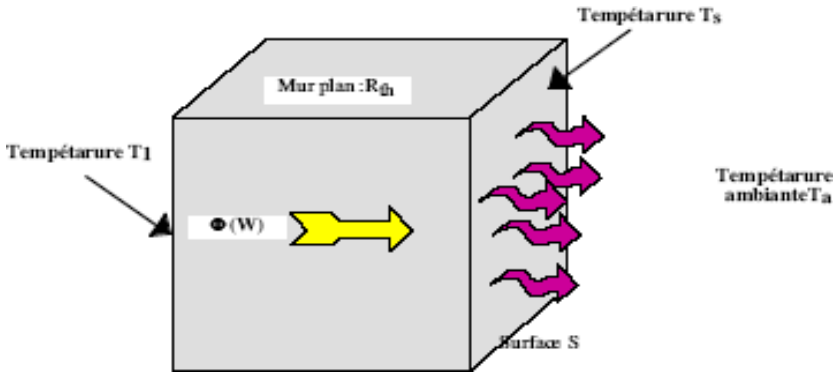
II.2.2.3- transfert de chaleur par rayonnement :

On entend par rayonnement thermique, l'émission d'énergie susceptible de se transmettre dans le vide, il s'agit du rayonnement électromagnétique. Dans la pratique, le rayonnement s'effectue en présence d'un gaz, c'est la raison pour laquelle le rayonnement est rarement le seul type d'échange thermique mis en jeu : la convection et la conduction sont également présentes. Cependant aux hautes températures, le rayonnement prend une importance prépondérante.

Le rayonnement des corps est dû à des transitions énergétiques par exemple des états de vibrations quantifiées de la chaîne d'atomes. Lorsque l'état du système passe d'un niveau énergétique E au niveau E+dE, il y a émission d'un photon de fréquence ɣ tel que h ɣ= dE avec h = 6.6 10^{-34} Js^{-1} la constante de **Plank**. Par exemple un rayonnement infrarouge ayant une longueur d'onde de 1μm correspond à une fréquence ɣ= c/λ = 3.10^{14} Hz et possède une énergie de dE = h ɣ = 1.9810^{-19} J soit 1.23 eV.

Si un corps rayonne, il émet donc de l'énergie et sa température doit baisser. Cependant dans la pratique un corps n'est jamais isolé. Il est en équilibre avec le milieu qui l'entoure et par conséquent il reçoit lui-même de l'énergie et sa température atteint un équilibre.

On peut exprimer le phénomène global du rayonnement de la façon suivante. Considérons en figure II.3 un mur de surface S dont les deux faces sont respectivement maintenues aux températures T_1 et T_s. (T_1> T_s). Ce mur est donc soumis à un Phénomène de conduction. On suppose que seule la surface située à droite échange de la chaleur par rayonnement avec le milieu ambiant à la température T_a. [26]



Figure(II.4): transfert thermique par rayonnement

D'après la loi de Stéphan, le flux de chaleur échangé entre la surface S et le milieu ambiant peut S'écrire :

$$\boldsymbol{\varphi(W) = \varepsilon.\sigma.A(T_s^4 - T_a^4)} \qquad \textbf{(II.14)}$$

- $\boldsymbol{\sigma}$: constante de Stephan Boltzmann 5.67 10^{-8}W.m^{-2}.K^{-4}
- **A** : surface d'échange (m^2)
- $\boldsymbol{\varepsilon}$: coefficient d'émission de la surface (ε = 1 pour un corps noir, ε <<1 corps brillant)
- **Ts** : température de surface du corps
- **Ta** : température ambiante.

II.3. Les conditions aux limites:

Les conditions aux limites (CL) peuvent avoir plusieurs formes. Elles traduisent les transferts entre les différentes parties du corps et son milieu environnant. Usuellement, on distingue plusieurs types de conditions :

II.5.1.Condition de Dirichlet :

Qui fixent la température T_S à la surface des corps (ou sur une partie de la surface) à Chaque instant:

$$T_S = T(x_s, y_s, z_s) \qquad \textbf{(II.15)}$$

II.3.1.Condition de Robin-Fourier :

Ces conditions donnent la température environnante du corps T_e et la loi qui décrit le transfert thermique entre le corps et sont environnement. Ce type de transfert qui a lieu à la surface du corps est très complexe, étant donné le grand nombre de variables qui sont impliquées. La loi de newton établit la relation entre la densité de flux thermique transféré à la surface du corps, de température T_c, vers son milieu environnant de température T_e(T_e<T_c) :

$$\boldsymbol{\varphi = h\,(T_c - T_e)} \qquad \textbf{(II.16)}$$

Où h est un facteur de proportionnalité appelé coefficient de transfert thermique, [10]

II.4. Modèle de turbulence k-ε :

Il existe différents modèles de turbulence, qui se distingue par un nombre d'équation de transport supplémentaires nécessaires pour fermer le système d'équations du problème à résoudre. Dans notre cas, on a utilisé le modèle k-ε standard qui est un modèle semi empirique basé sur le concept de Boussinesq reliant les contraintes de Reynolds au taux de déformation moyen :[27]

$$-\boldsymbol{\rho}\overline{u_i'}\boldsymbol{\rho}\overline{u'_j} = \mu_t\left[\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial i}\right] - \frac{2}{3}\delta_{ij}\,\boldsymbol{\rho k} \qquad \textbf{(II.17)}$$

$\left[\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial i}\right]$: est le tenseur de déformation.

Où $k = \frac{\overline{U_i'^2}}{2}$ représente l'énergie cinétique turbulente.

Par analogie avec la viscosité laminaire caractérisée par une vitesse (des molécules) et une distance (le libre parcours moyen), la viscosité turbulente, caractérisée par une vitesse $\sqrt{K}$ et une distance $K = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$ est donnée par B

$$\boldsymbol{\nu_t = C_\mu \sqrt{K}\,\frac{k^{3/2}}{\varepsilon} = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}} \qquad \textbf{(II.18)}$$

Avec :c =0.09 et ε le taux de dissipation.

K et ε sont obtenus à partir de leur équation de transport présentée ci-dessous.

II.4.1. Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k :

$$\frac{\partial}{}(\boldsymbol{\rho} KU) = \frac{\partial}{}\left[(\mu + \mu t)\frac{\partial k}{}\right] + G + \boldsymbol{\rho}\varepsilon \qquad \textbf{(II.19)}$$

∂x_i ∂x_j σ_k ∂x K

1 2 3 4

1 : terme convectif

2 : terme diffusif

3 : taux de production

4 : taux de dissipation

II.4.2. Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ε :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad \text{(II.20)}$$

Le terme de production G_k est donnée par :

$$G_k = -\rho \overline{U_i U_j} = \rho \upsilon_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \qquad \text{(II.21)}$$

II.5. La méthode volume-of-fluide (VOF):

La méthode VOF est une méthode qui a été introduite par Hirt & Coll. en 1981 qui s'utilise pour la simulation d'écoulements entre plusieurs phases non miscibles. Il s'agit d'une méthode Eulérienne à 1 fluide, et elle est particulièrement adaptée dans le cas d'écoulements à interfaces fortement déformées, puisqu'elle permet de suivre la position de l'interface dans un maillage fixe. [25]

Le régime VOF est utilisé pour suivre le déplacement de la surface libre. Chaque élément est défini comme un volume du contrôle dans ce régime, et la fraction volume du fluide F, définie sur chaque volume de contrôle, satisfait l'équation suivant, les mouvements de surface libre.

$$\frac{\partial F}{\partial T} + u.\nabla F = 0 \qquad \text{En } \Omega \qquad \text{(II.22)}$$

F : représente le facteur de remplissage,

U : désigne vecteur vitesse,

t : représente le temps et Q.

Ω : est le domaine de calcul.

II.5.1. Calculs équilibrés et transitoires de la méthode VOF :

La formulation de la méthode VOF se fonde sur le fait que deux ou plusieurs fluides (ou phases) n'interpénètrent pas. Pour chaque phase supplémentaire que nous joutons à notre modèle, une variable est introduite. En chaque volume de contrôle,Les fractions volumiques de toutes les phases sont sommées à l'unité. Les champs pour toutes les variables et propriétés sont partagés par les phases et représentent des valeurs volumiques moyennes, la fraction volumique de chacune des phases est connue à chaque emplacement. Ainsi les variables et les propriétés en n'importe quelle cellule donnée sont purement représentant d'une des phases, ou représentant d'un mélange des phases, selon les valeurs de la fraction volumique. En d'autres termes, si la fraction volumique de K^{ieme} fluide dans la cellule est notée par C_k , elle peut prendre une des cas suivant :

- $C_k = 0$: la cellule et vide (du K^{ieme} fluide);
- $C_k = 1$: la cellule et vide (du K^{ieme} fluide);
- $0<C_k< 1$: la cellule contient l'interface entre le fluide K^{ieme} et un ou plusieurs autres fluides.

Avec :

$$C_k = \frac{\partial \Omega_k}{\partial \Omega_{maill}} \qquad \textbf{(II.23)}$$

$\partial\Omega_{maill}$ **:** représente le volume total de la maille de calcul et Ω_k le volume de la partie de la maille occupée par la phase. Basé sur la valeur locale du, les propriétés et les variables appropriées seront assignés à chaque volume de contrôle dans le domaine.

II.5.2. Equation de la fraction volumique :

Le cheminement de l'interface (s) entre les phases est accompli par la solution d'une équation de continuité pour la fraction volumique d'une (ou plus) des phases. Pour La K^{ieme} phase, cette équation a la forme suivante :

$$\frac{1}{\rho_k}\left[\frac{\partial}{\partial t}(C_k \rho_k) + \nabla.(C_k \rho_k \vec{V}_k) = S_{ck} + \sum_{p=1}^{n} (\dot{m}_{pk} - \dot{m}_{kp})\right] \qquad \textbf{(II.24)}$$

est le transfert de masse à partir de la phase k à la phase p et $\dot{m}_{pk}$ est le transfert de masse à partir de la phase p à la phase k. Par défaut, la limite de source du côté droit de

l'équation (II.25), $\mathbf{S_{ck}}$ est zéro, mais nous pouvant spécifier une source de masse constante ou définie par l'utilisateur pour chaque phase.

L'équation de la fraction volumique ne sera pas résolue pour la phase primaire ; La fraction volumique de la phase primaire sera calculée est basé sur la contrainte suivante :

$$\sum_{k=1}^{n} \mathbf{Ck=1} \qquad \textbf{(II.25)}$$

II.5.CONCLUSION :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes équations utilisés pour résoudre un problème couplé dans le cas diphasique, où la méthode de volume de fluide (VOF) qui est une méthode de construction d'interface est utilisée. La résolution analytique de problèmes de notre est souvent impossible, donc on fait appel aux méthodes numériques. C'est l'objectif du chapitre suivant.

CHAPITRE III

les méthodes discrétisation

III.1. INTRODUCTION :

Les équations de base régissant le phénomène conjugué du remplissage d'une empreinte ont été établis dans le chapitre II. On savait que la solution analytique exacte est possible pour de certains cas d'écoulements simples. Pour le cas général des écoulements turbulents en diphasique(VOF), le système d'équations ne peut être résolu directement vu la non-linéarité des équations. En raison de leur complexité, ces équations sont résolues à l'aide d'une méthode numérique. Plusieurs méthodes numériques sont disponibles dans la littérature (éléments finis, différences finies et volumes finies).

Ces méthodes tendent toutes à linéaires les systèmes d'équations en des systèmes algébriques dont la résolution est possible.

Le but de ce chapitre n'est pas de détailler précisément chaque méthode mais plutôt de présenter les différentes approches et de justifier notre choix.

III.2. méthodes de discrétisation :

La discrétisation se fait en suivant des trois méthodes :

- Méthode des différences finies.
- Méthode des volumes finis.
- Méthode des éléments finis.

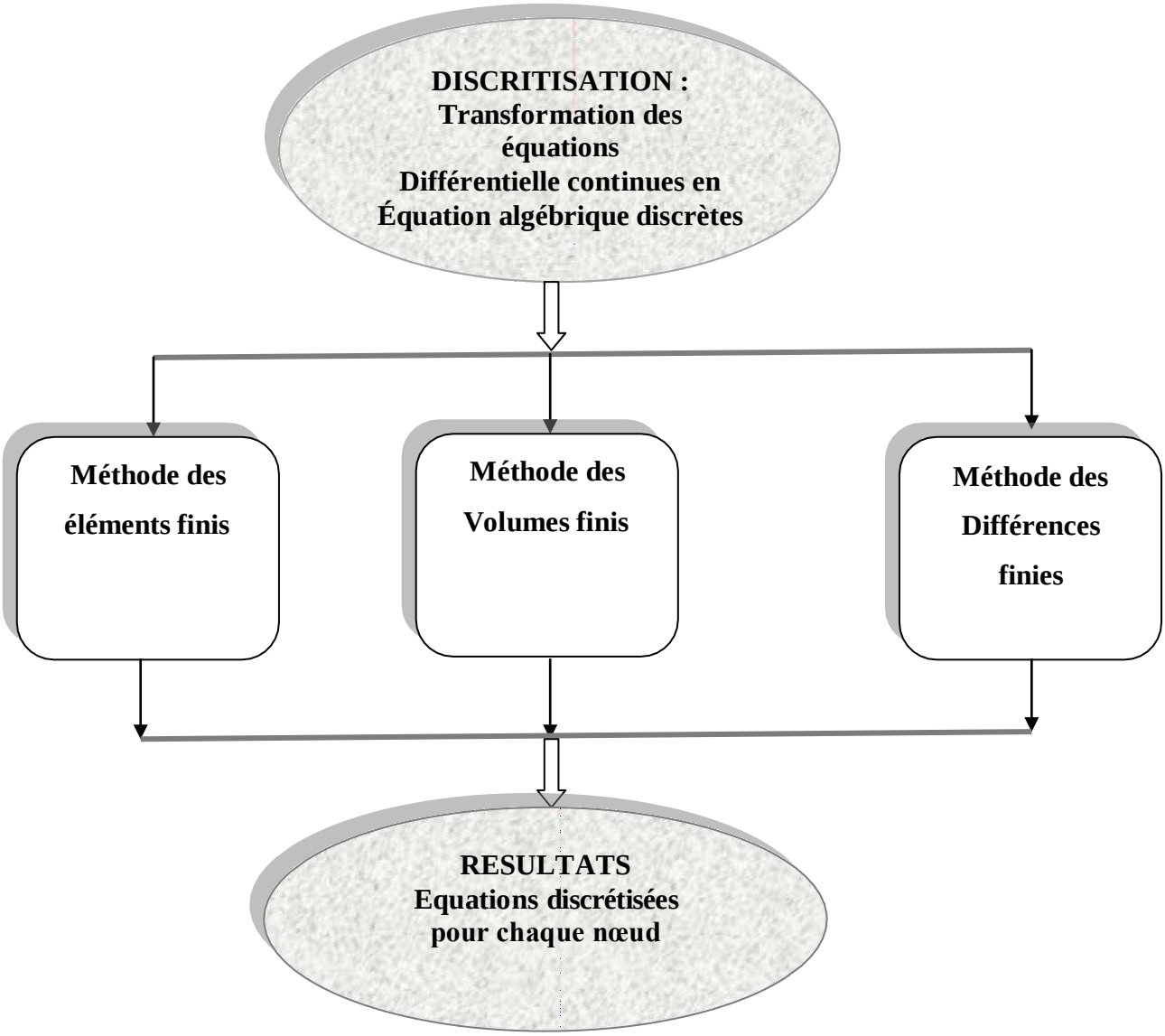


Figure (III.1) : méthode de discrétisation.

III.2.1 Méthode des différences finies :

La méthode des différences finies consiste à remplacer les dérivées apparaissant dans le problème continu par des différences divisées *ou* combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets on nœuds du maillage.

Avantage :

- ✓ grande simplicité d'écriture.
- ✓ faible coût de calcul.

Inconvénients :

- ✓ Limitation de la géométrie des domaines de calculs.
- ✓ difficultés de prise en compte des conditions aux limites portant sur les dérivées ou les gradients de l'inconnue.
- ✓ en général absence de résultats de majoration d'erreurs. [28]

III.2.2. Méthode des volumes finis :

Le principe de cette méthode est de subdiviser le domaine de calcul en un nombre de Volume de contrôle juxtaposé. Chacun de ces derniers englobe un "nœud principal".
La méthode des volumes finis intègre, sur des volumes élémentaires de forme simple, les équations écrites sous forme de loi de conservation. Elle fournit ainsi de manière naturelle des approximations discrètes conservatives et est donc particulièrement bien adaptée aux équations de la mécanique des fluides : équation de conservation de la masse, équation de conservation de la quantité de mouvement, équation de conservation de l'énergie.

Sa mise en œuvre est simple si les volumes élémentaires sont des rectangles (ou des Parallélépipèdes rectangles en dimension 3). [28]

Avantage :

- ✓ Préservation du caractère conservatif des équations sur chaque volume de contrôle (continuité des flux aux interfaces), valable pour n'importe quelle finesse du maillage ;
- ✓ Mise en œuvre relativement facile ;
- ✓ Applicable aux géométries complexes ;
- ✓ Temps de calcul et stockage mémoire raisonnable (matrice de type bande) [28]

Inconvénients :

- ✓ Moins précis que les méthodes spectrales.
- ✓ on dispose de peu de résultats théoriques de convergence. [28]

III.2.3 Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forme variationnelle (comme rninimisation de l'énergie, en général) dans un espace de dimension infinie. La solution approchée est dans ce cas une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres comme, par exemple, ses valeurs en certains points (les nœuds du maillage). [28]

Avantages :

- ✓ Traitement possible de géométries complexes.
- ✓ détermination plus naturelle des conditions aux limites.
- ✓ possibilité de démonstrations mathématiques de convergence et de majoration d'erreurs.

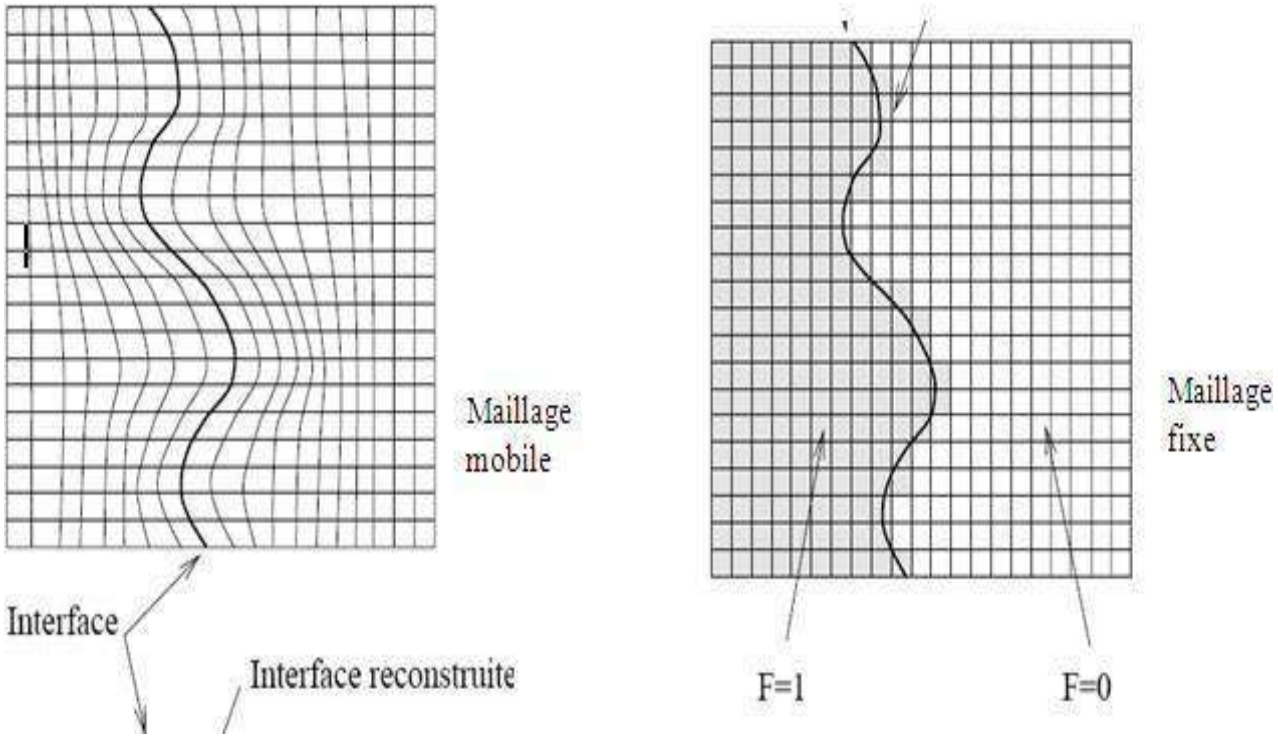
Inconvénients :

- ✓ Complexité de mise en œuvre
- ✓ coût en temps de calcul et en mémoire.

Dans ce qui suit on se limite a examiné uniquement la méthode des éléments finis, nous venons de décrire succinctement l'approche globale de cette méthode. Par la suite, nous exposerons les principales étapes mathématiques de discrétisation de l'équation de chaleur par cette dernière.

III.3 Calcul d'interfaces :

Les techniques de calcul d'interfaces peuvent être très différentes en fonction du problème à résoudre, et se divisent généralement en deux principales familles en fonction de maillage (figure III.2) que l'on va utiliser : la méthode lagrangienne (sur maillage mobile) et la méthode eulérienne (sur maillage fixe).



a) méthode Lagrangienne **b) méthode Eulérienne**

Figure(III.2) : Présentation des méthodes de calcul d'interface

III.4. Maillage :

Le maillage est la première étape de la méthode des éléments finis. C'est une étape fondamentale qui conditionne tout le reste du calcul : le temps de calcul et les ressources nécessaires (mémoire vive, mémoire virtuelle, temps processeur), la précision des résultats, la stabilité du modèle (possibilité de divergence dans le cas de calculs non-linéaires)[29]. L'objet de cette opération c'est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et, éventuellement, son environnement (le milieu), dans l'optique de simulations de calculs ou de représentations graphiques (figure III.3).

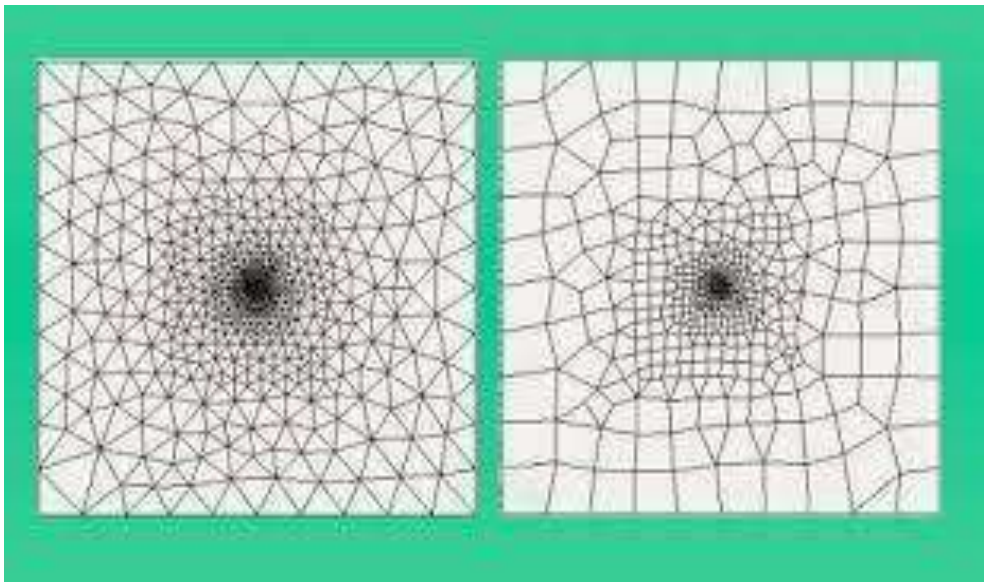


Figure (III.3) : Maillage carré [28]

Toutes ces opérations sont assistées par des logiciels dédiés à éléments finis.

III.3.1.1.**les méthodes lagrangiennes :**

Les méthodes lagrangiennes, sur maillage mobile permettent de représenter l'interface comme une réelle discontinuité et de suivre son évolution de manière très précise. Le transport de l'interface s'effectue soit en déformant le maillage au cours du calcule soit en régénérant le maillage après avoir advecté l'interface. Le principal avantage de cette méthode est de suivi très précis de l'interface qui permet d'imposer très facilement et avec rigueur les conditions aux limites de l'interface. Ces méthodes sont limitées aux écoulements ou l'interface ne subit pas de grandes déformations, car cela conduit a des maillages trop déformés. [29]

III.3.1.2 .les méthodes eulérienne :

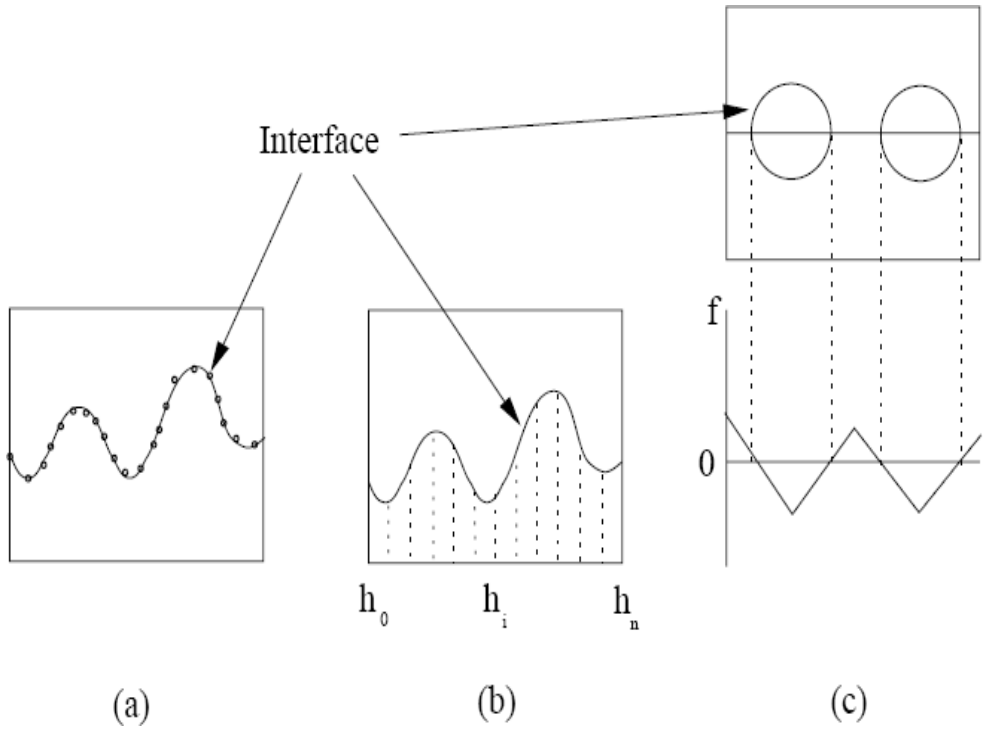
Les méthodes eulériennes sont en général utilisées sur un maillage fixe. Dans ces méthodes, une fonction de présence permet de localiser la présence de volume. L'interface est alors reconstruite à partir de chargement des propriétés physiques. Les méthodes eulériennes peut être classées en deux catégories:

- Les méthodes de suivi de front
- Les méthodes de suivi de volume

III.3.1.3. Les méthodes de suivi de front :

Il existe différente méthode pour marquer l'interface:

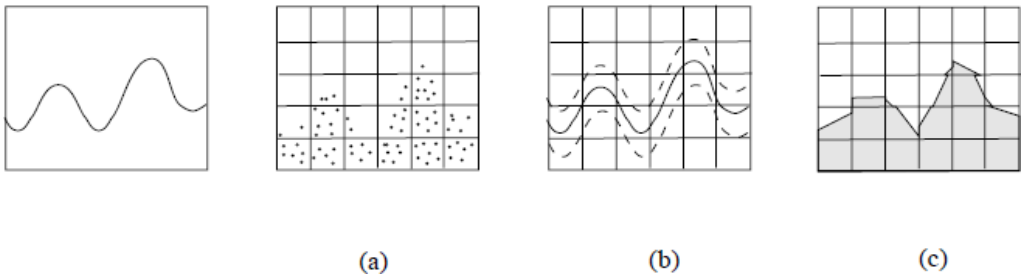
a) Marqueurs de surface
b) Fonction de hauteur
c) Méthode de ligne de niveau (lève set)



Figure(III.4): Différentes méthodes de suivi de front,

III.3.1.4. Les méthodes de suivi de volume :

Dans les méthodes de suivi de volume, le fluide est utilisé comme marqueur en utilisant une fonction de présence. C'est là que se situe le principal défaut de ces méthodes car la position de l'interface n'est pas connue explicitement.



Figure(III.5) : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque :

(a) Méthode MAC

(b) schéma TVD

(c) Méthode VOF

Nous utilisons pour la méthode VOF (volume of fluid) une fonction scalaire dont la valeur varie entre zéro et un pour repérer les deux fluides. Cette fonction scalaire représente le volume occupé par le fluide dans une cellule de calcul, donc une maille pleine de fluide à une valeur de un et une maille vide zéro. Si la valeur de la fraction volumique est comprise entre ces deux valeurs, cela indique la présence de l'interface et on connaitra directement la proportion occupée par le fluide (figure III.6).

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00
0.00	0.42	0.01	0.45	0.82	0.01
0.48	1.00	0.46	0.00	1.00	0.88
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Figure(III.6) : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret.

III.4. Simulation numérique en fonderie :

Importance de la simulation numérique dans l'étude du remplissage en fonderie :

Du fait de la complexité des phénomènes mécaniques et thermomécaniques mis en jeu, le bon déroulement du remplissage et de la solidification demande beaucoup de précautions. La méthode empirique de mise au point d'un procédé, même si elle s'appuie sur le savoir faire, des « recettes » et des calculs éprouvés, nécessite de nombreux essais avant d'obtenir un résultat satisfaisant, et par conséquent engendre des coûts non négligeables. De plus, lorsque des défauts apparaissent, elle ne permet pas d'analyse a posteriori. Ajoutons enfin que la sur-dimension des masselottes qui permet d'assurer un bon déroulement de ces phases, implique des pertes importantes en matériaux et donc en énergie de fusion (pour des lingots, par exemple)

L'utilisation de l'outil numérique est un atout essentiel dans la conception des procédés, mais aussi dans leur optimisation. Elle permet de diminuer le nombre des essais de mise au point, et donc les coûts, pour améliorer la qualité des pièces obtenues, comprendre les défauts éventuels, ou encore diminuer la taille des masselottes. Elle est aujourd'hui un élément essentiel pour la compétitivité et le développement de l'industrie de la fonderie.

Logiciels de simulation utilisés en fonderie :

Au cours des vingt dernières années, de nombreux logiciels ont été développés pour l'étude du remplissage des moules en fonderie, que se soit par chute ou sous pression. On donne sur le tableau (1,1), une liste des principaux logiciels de simulation numérique actuellement commercialisés. Ce tableau est basé sur la réactualisation des informations sur les logiciels qui ont été confrontés dans *Sirell* et *al* [30], mais aussi sur l'étude bibliographique faite sur les logiciels de mécanique des fluides de Winther[31] et enfin sur un rapport interne de *Meuland* [32].Notons que par modélisation du refroidissement nous entendrons l'étude des contraintes dans le moule et la pièce, ainsi que la modélisation de la solidification. Dans le cas où ces conditions ne sont pas remplies, un tiré figurera dans la colonne correspondante à la place du type de méthode utilisé.

Logiciel	Modélisation du remplissage		Modélisation du refroidissement
	Méthode	Maillage	
ProCast	Eléments Finis	non structuré	Volumes finis et Eléments finis
Physica +	Volumes finis	non structuré	Volumes finis
Fluent	Volumes finis	non structuré	---
Flow3D	Volumes finis	structuré	---
CastCAE	Volumes finis	structuré	---
WRAFTS	Eléments Finis	structuré	---
FIDAP	Eléments Finis	non structuré	---
Phoenics	Volumes finis	structuré	---
Rapid/CAST	Eléments Finis	structuré	---
PAM CAST/Simulor	Volumes finis	structuré	Eléments Finis
Magmasoft	Différences Finis	structuré	Eléments Finis

Tableau (1.1). Logiciels de simulation utilisés en fonderie.

III.4.1. Mise en œuvre numérique :

A l'heure actuelle, il existe un certain nombre de codes industriels conviviaux, aux meilleurs performants, permettant la prédiction d'écoulement fluides par la résolution des équations de Navier-Stokes grâce aux méthodes des volumes finis, des différences finies ou des éléments finis (ANSYS , FLUENT,CFX-F3D, PHOENICS, STAR-CD, TRIO….). Pour notre travail, nous avons eu recours au code ANSYS, [30]

III .5.Logiciel de simulation ANSYS :

ANSYS est un logiciel de simulation numérique FEM leader de son marché utilisé dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation : le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement de résultats et l'optimisation. ANSYS offre une plateforme de calcul multi-physique intégrant la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation de systèmes et de circuits.

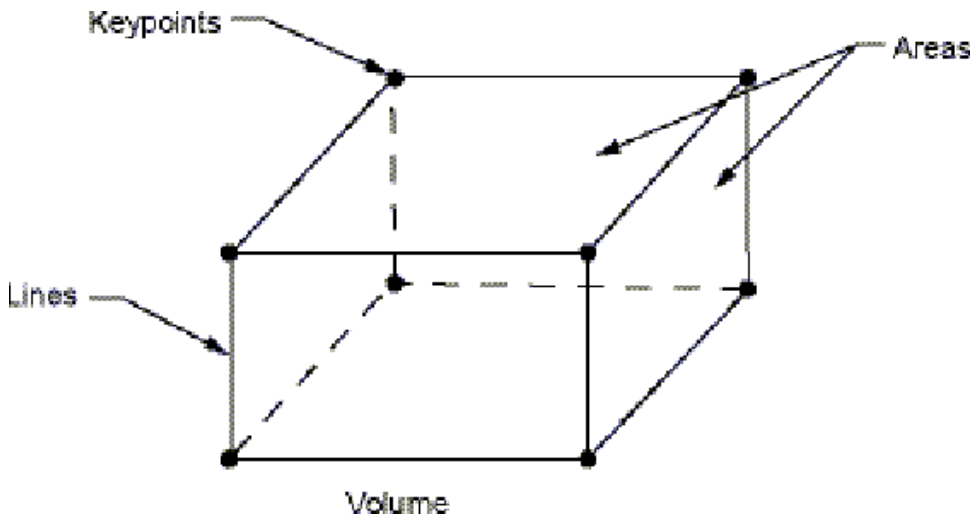
Les utilisateurs ANSYS sont de domaines industriels différents telles que la construction de machines, les secteurs de l'énergie, l'automobile, le ferroviaire, l'aérospatial, le médical, la microtechnique, la micro-électronique ou encore les biens de consommation.
CADFEM est le centre de compétences et le partenaire d'Ansys en Europe et en Afrique du Nord.[33]

La mise en œuvre d'une simulation de fonderie se fait en plusieurs phases : définition de la géométrie, maillage, définition des matériaux et des paramètres du procédé, calculs,

visualisation et analyses des résultats.

III .5.1. Définition de la géométrie :

La première étape dans la mise en œuvre d'une simulation numérique en fonderie est la définition de la géométrie.



Figure(III.7): Définition de la géométrie

Les points qui définissent les sommets de modèle s'appellent les keypoints et sont les entités de modèle plein de " bas-ordre ". Si, en établissant notre modèle plein, vous créez d'abord nos keypoints, et employons ensuite ces keypoints pour définir les entités " évoluées " de modèle plein (c'est-à-dire, lignes, secteurs, et volumes), vous seraient constituant votre modèle " du fond." Des modèles établis du fond vers le haut sont définis dans le système du même rang actuellement actif. [18]

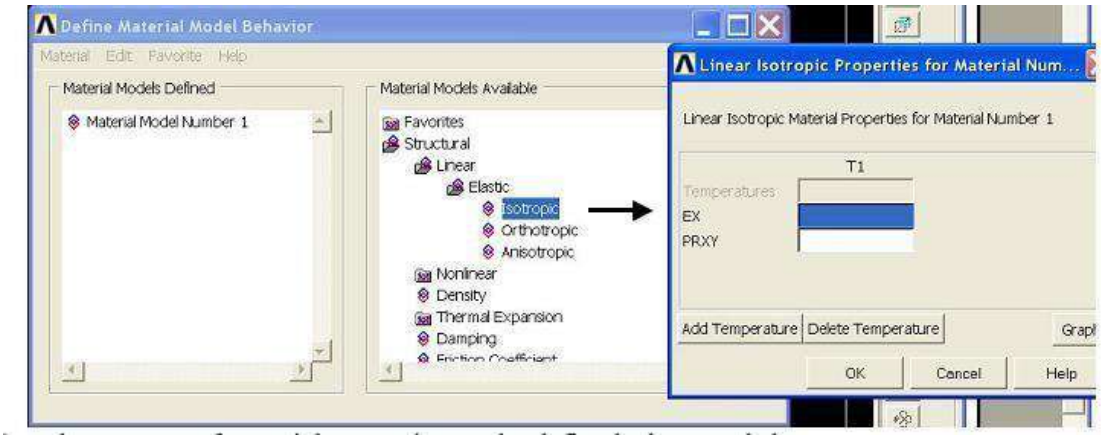
III.5.1.1. Définition des matériaux et des paramètres du procédé :

Les résultats de la simulation dépendent beaucoup de l'adéquation entre les données qui vont être renseignées dans cette partie et les valeurs réelles. ANSYS possède des bases de données matériaux qui ne sont soit peu fiables soit incomplètes. Il est nécessaire de réaliser des expériences permettant de déterminer les valeurs de températures (solidus, liquidus, eutectique), d'enthalpie, de la chaleur massique, de la masse volumique, de la fraction

solide, de la conductivité thermique (moule, métal, poteyages), de la viscosité, des résistances thermiques de contact métal/moule, des caractéristiques hydrauliques des filtres, etc. pour valider les bases de données du logiciel ou pour ajouter de nouveaux matériaux à la base de donnée.

Pour définie les propriétés matérielles :

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models

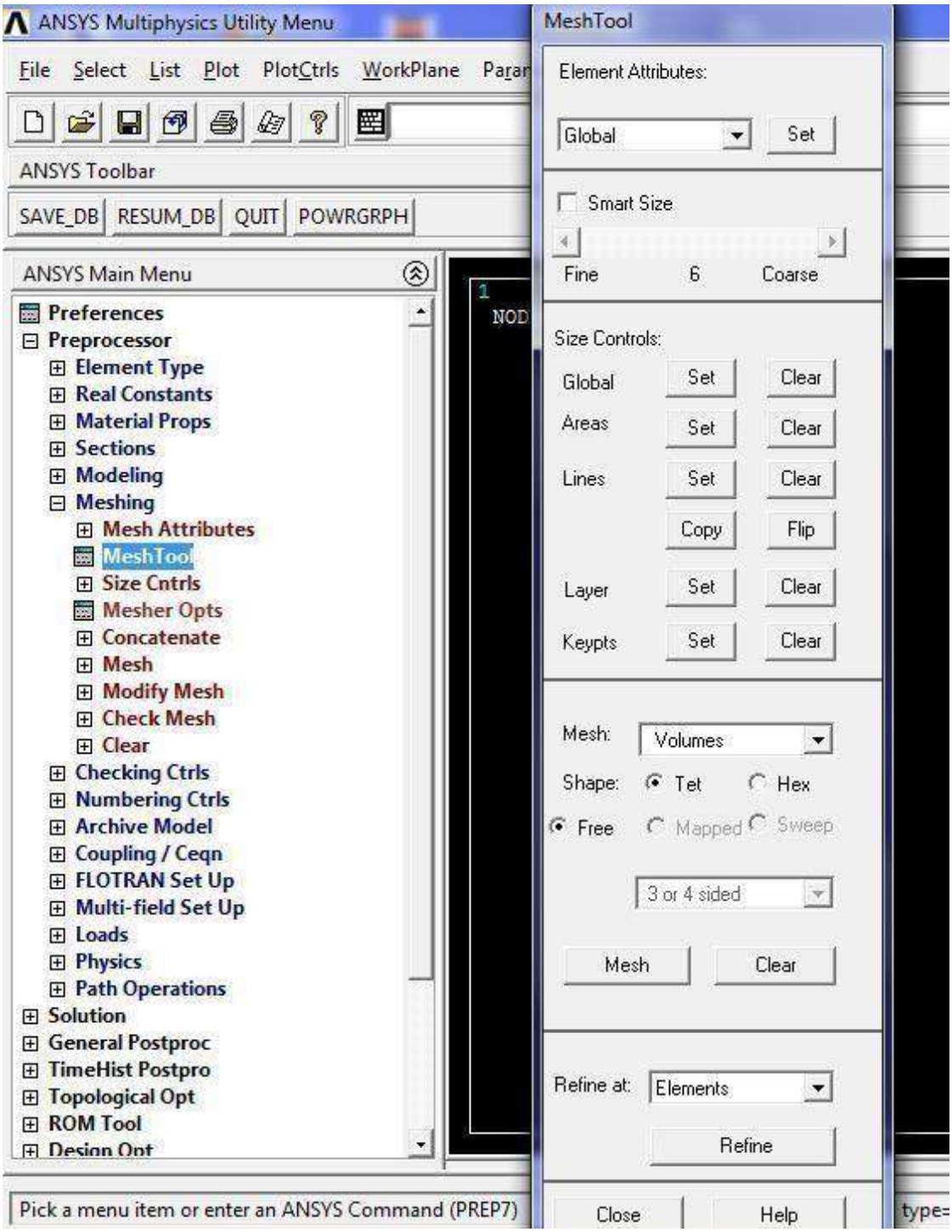


Figure(III.8): Définition des propriétés des matériaux

Les conditions aux limites d'échanges thermiques entre le moule et le milieu environnant, les circuits de refroidissement, les tirages d'air doivent aussi être renseignées. Il est possible d'utiliser des modèles simplifiés sur ANSYS pour déterminer l'influence qualitative et quantitative de chaque milieu extérieur sur la thermique du moule. Ce calcul préliminaire peut être utile pour simplifier la géométrie et éliminer des paramètres qui n'ont pas d'importance compte tenu de la précision attendue. [30]

III.5.1.2. Maillage de la géométrie :

Une fois la géométrie définie, elle doit être subdivisée en un nombre fini de petits volumes sur lesquels seront résolues les équations. Il existe deux grands types de maillage:



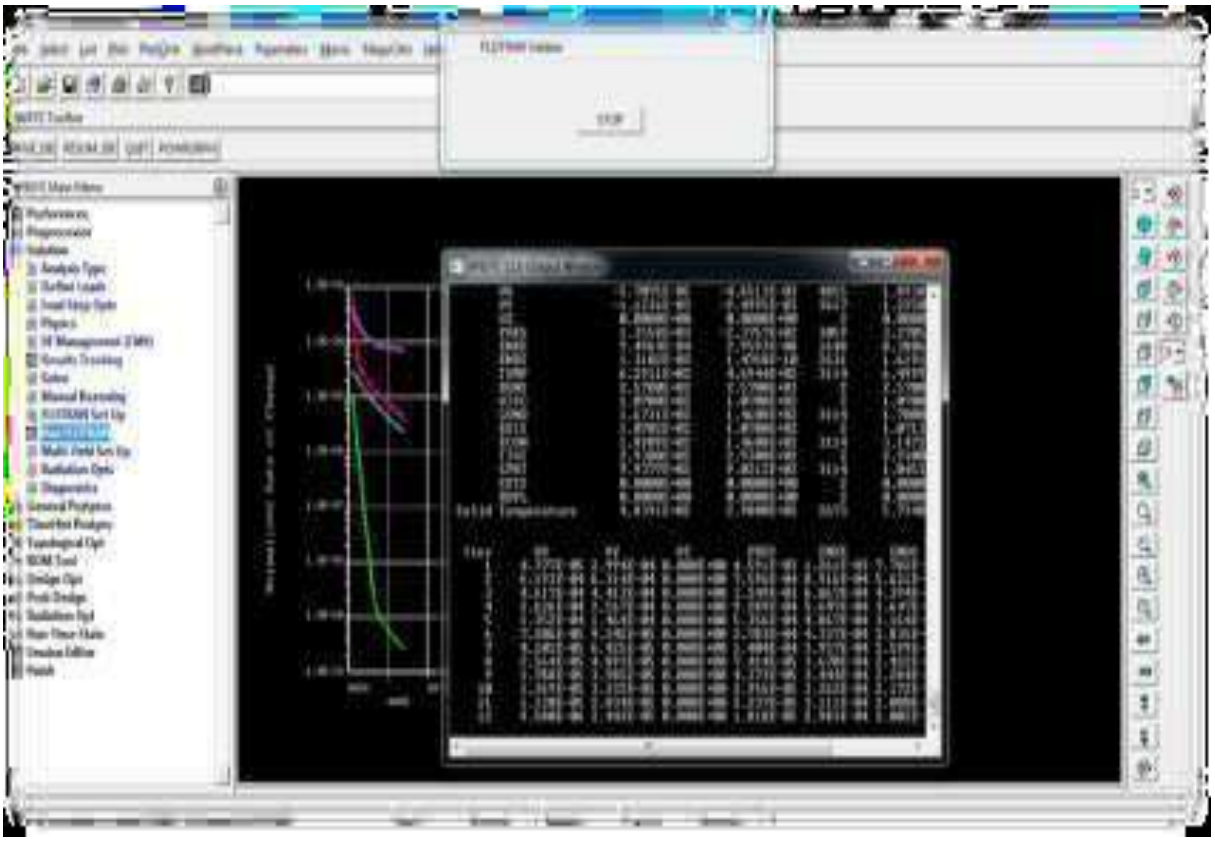
Figure(III.9) : Maillage de la géométrie

Les maillages non structurés permettent la résolution des équations par la méthode des éléments finis. Ils sont constitués de tétraèdres ou d'hexaèdres, représentent presque parfaitement n'importe quelle surface complexe et autorisent facilement des raffinements locaux. Ils sont parfaitement adaptés aux calculs thermiques et mécaniques.

La finesse du maillage est un facteur important : plus le maillage est fin, meilleure sera la solution. Mais le temps de calcul deviendra de plus en plus long. Il faut trouver un compromis finesse du maillage/temps de calcul. Il est possible d'utiliser un maillage grossier pour la mise au point des données, lors de la prise en main du logiciel et de ne utiliser un maillage très fin que pour le calcul final. [30]

III.5.1.3. Calculs :

Dans cette étape les équations régissant le remplissage, la solidification et le refroidissement de la pièce sont résolues sur le maillage en utilisant les conditions aux initiales et les conditions aux limites définies dans l'étape précédente.



Figure(III.10): Phase du Calcul

III .5.1.4.Visualisation et analyse des résultats :

Les logiciels de simulation sont dotés d'interfaces (post processeurs) de visualisation des résultats, de sorties graphiques ou d'animations pour aider l'utilisateur dans l'interprétation des résultats.

III .6.Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait un aperçu sur les méthodes numérique utilisées pour le traitement des problèmes thermiques, Tout d'abord les différentes méthodes de discrétisation ont été abordées. Ensuite, nous avons donné brièvement une théorie sur les éléments finis. Celle-ci correspond à la méthode utilisée par notre simulateur de référence (ANSYS).

En effet, il s'agissait uniquement d'exposer la démarche générale et les concepts qui seront nécessaires à la bonne compréhension des travaux ultérieurs (la simulation numérique de remplissage des moules qui saura introduire dans le prochain chapitre).

CHAPITRE VI

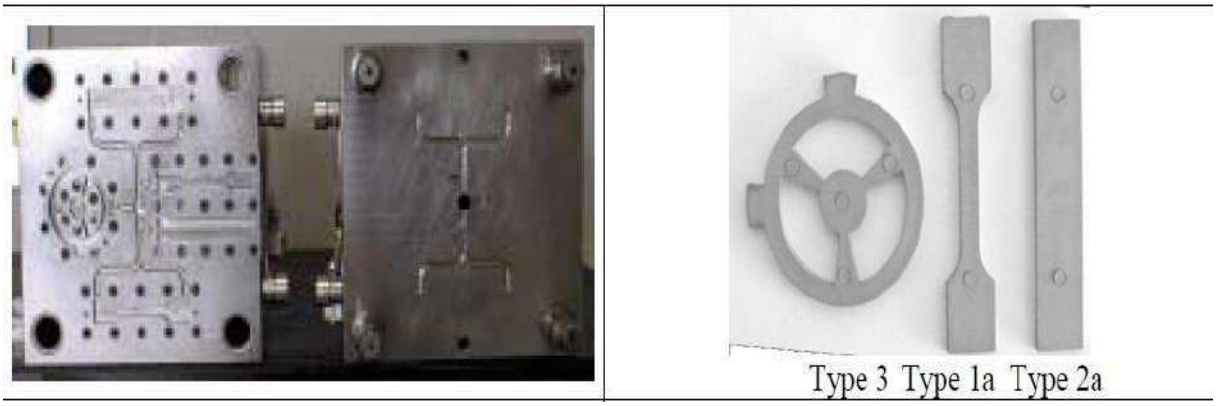
Résultats et discussion

IV. 1.Introduction :

Le chapitre IV porte sur l'étude du transfert de chaleur et de l'écoulement du fluide chaud (fer) qui s'écoule dans un moule pour reproduire , après refroidissement ,une pièce donnée .le champ de température transitoire de la paroi de moule (l'acier) et de trajectoire de fer avec la comparaison de la présence ou l'absence de champ magnétique est évalué par un modèle CFD ,appliqué sur le code ANSYS/FLOTRAN , il s'agit ici de réaliser une expérience numérique du remplissage d'un moule en 2D d'une pièce .

IV.2. Indentification et validation de la simulation numérique

Dans cette partie dont l'objectif est d'assures le bon déroulement de notre simulation numérique, nous comparons nos résultats à ceux obtenue dans les même contions par Thierry BARRIERE, Boasheng LIU, Jean-Claude GELIN [24], et de notre résultats nous avons varié tous les propriétés thermiques de fluide : la densité, la viscosité dynamique et la conductivité thermique en fonction de température. La géométrie de moule montre sur la figure si après.



.

Figure.**IV.1** : le moule multi-empreinte de validation.

De cette validation procédé de coulée d'expérience (a) alliage de aluminium, et Les résultats de simulation sont les suivantes :

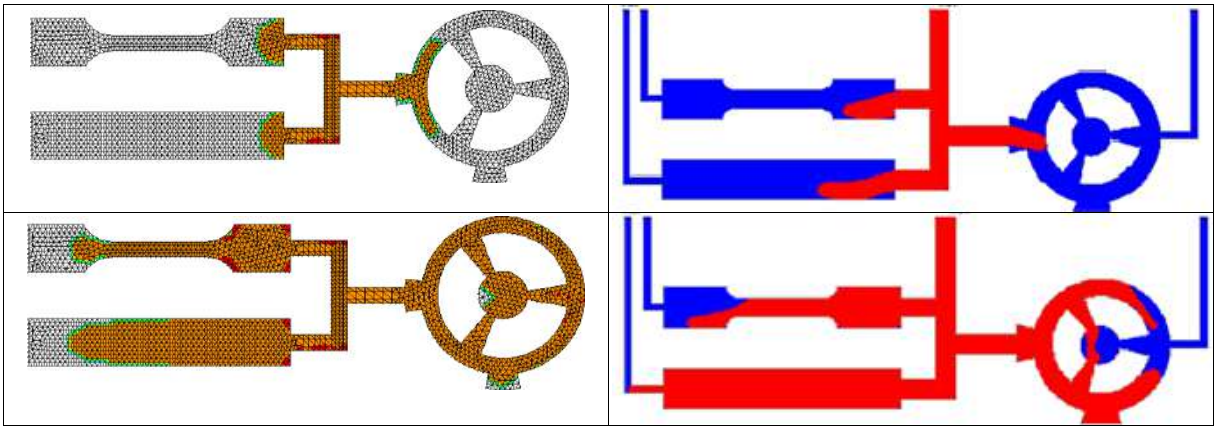


Figure.IV.2 : (a) Champs de fraction volumique de résultats de simulation Thierry BARRIERE, Boasheng LIU, Jean-Claude GELIN. **(b)** simulation notre analogique par le code de ANSYS.

IV.3. Les conditions initiales :

La température initiale du métal liquide était de 1200 k (Point de fusion de fer 838 c).

- La température de moule a été considérée égale à celle de l'environnement.
- Le métal liquide et le moule de l'acier ont été stabilisés dans des conditions normales de la pression atmosphérique.

IV.4. Les conditions limitent :

- La vitesse d'injection du fer liquide a été fixée à 10 m/s .
- L'algorithme de VOF a été employé pour le remplissage de moule.
- Le temps total pour le remplissage de moule est de 0.00999 s .
- La solution en 2D a été considérée.

Tableau (IV.1) : les propriétés thermiques de fer

Densité (kg/m3)	Chaleur spécifique (J/Kg.k)	Viscosité (Kg/ms)	Conductivité thermique (w/m.k)
6980	438	0.00544	80.2

Tableau (IV.2) : les propriétés de matériaux du moule en acier

Densité (kg/m3)	Chaleur spécifique (J/Kg.k)	Viscosité (Kg/m.s)	Conductivité thermique (w/m.k)
8000	400	/	25

Les propriétés du métal liquide utilisé dans la simulation de remplissage du moule sont énumérées dans le Tableau 1. Afin de simuler l'écoulement de métal liquide dans le moule en acier, avec taille de maillage pour les différentes expériences (0.003m) qui assure l'indépendance solution maillage ,ainsi que les conditions suivantes ont été considérées:

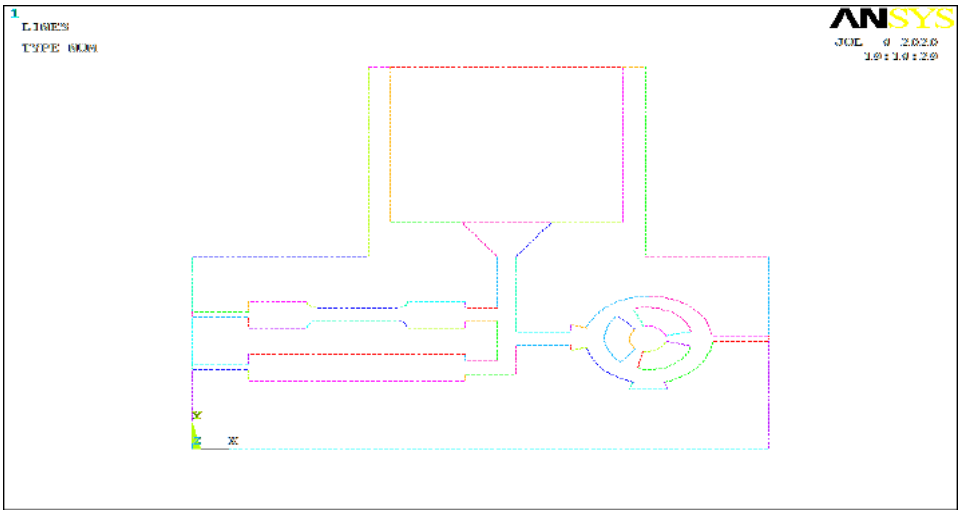


Figure. (IV.3) :la géométrie

Fig. (IV.2) : **le maillage de la géométrie**

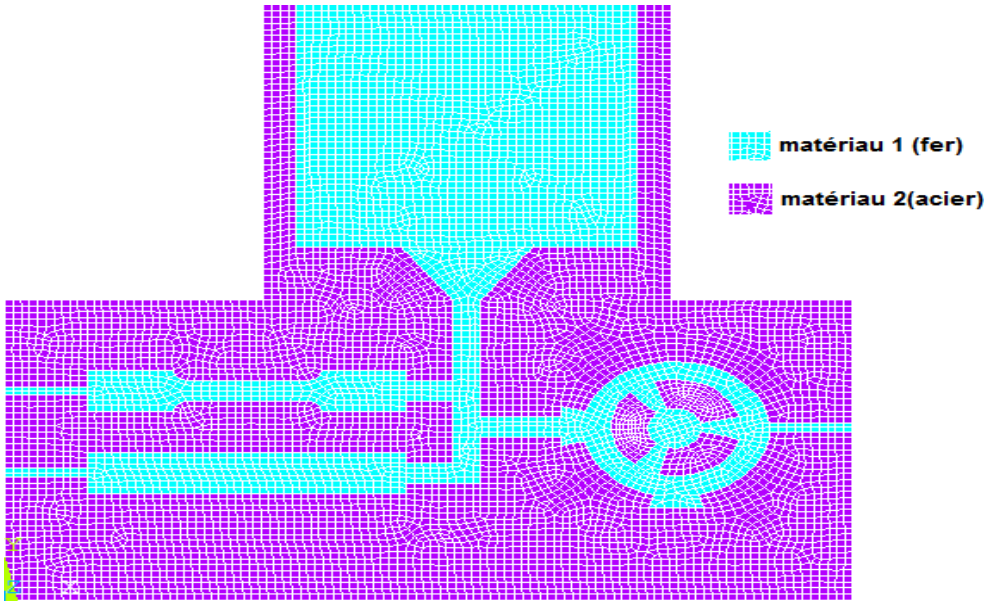


Figure. (IV.4) : **le maillage**

IV.5. Influence sur champ magnétique:

Dans cette partie, nous discutons d'une simulation numérique d'un remplissage du moule avec liquide (fer) de deux manières, la première avec champ magnétique et la seconde sans champ magnétique dans les mêmes conditions. Nous examinons également une comparaison entre les deux expériences :

IV.6. Expérience 01 : Sans champ magnétique

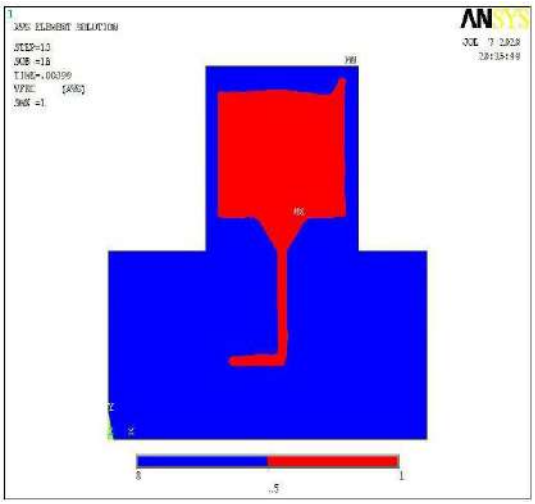
IV.6.1 interprétation des résultats de simulation :

1ére Partie : le remplissage de métal liquide dans le moule sans champ magnétique pour déférent temps

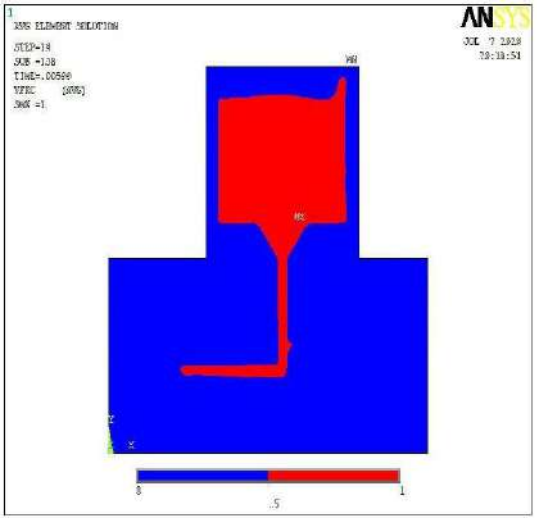
Dans cette partie on choisi un seul point de remplissage par gravitée déterminés les paramètres lié au remplissage de les empreintes. (Température, pression et le temps de remplissage)

D' ou la couleur rouge représente la cellule complètement rempli par le liquide, et la couleur bleu représente la cellule complètement vide.

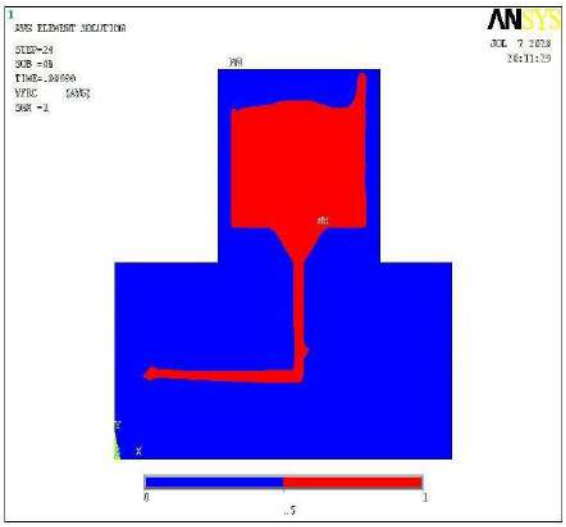
On remarque un nuage apparaissant à l'intérieur du moule dans le temps (t = 0,00599 sec) et ne complétant pas le remplissage. Après le temps (t = 0,00**999** secondes**(**,



T=0.00399 s



T=0.00599 s

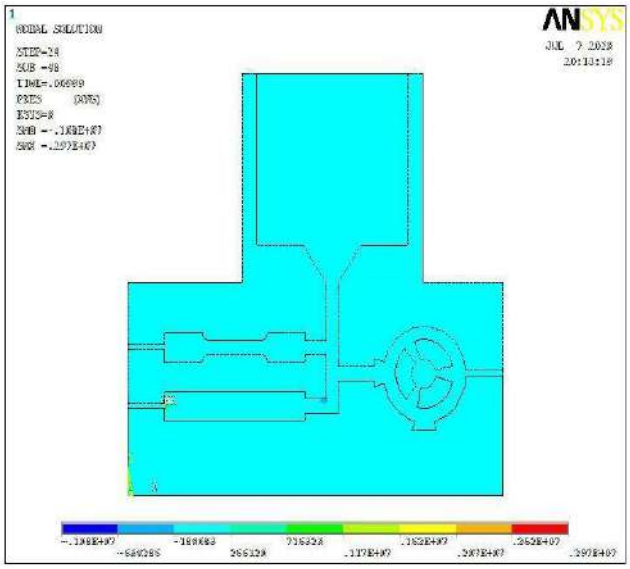


T=0.00999 s

Figure. (IV.5) Volume de fraction pendant le remplissage du moule

La figure IV.5 montre le flux de fer métallique à l'intérieur du moule à travers des tubes initialement, le flux de métal est lent, mais lorsque le volume du liquide diminue, la vitesse augmente. Ainsi, le liquide continue jusqu'à ce que le moule soit complètement rempli.

IV.6.2 Champ de pression : la figure (IV.6) représentation spatiale de pression dans le moule en fonction de temps.



T=0.00999 s

Fig.(IV.6) Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul.

La variation de la pression de quelque point : dans cette partie nous avons présenté la trajectoire de chaque point.

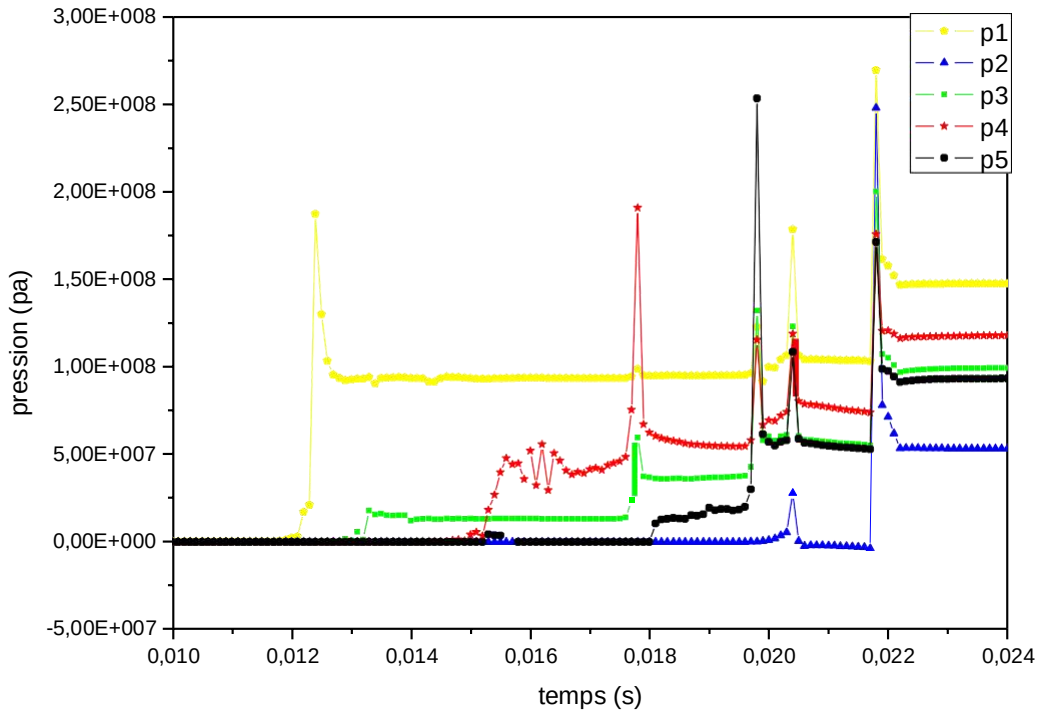
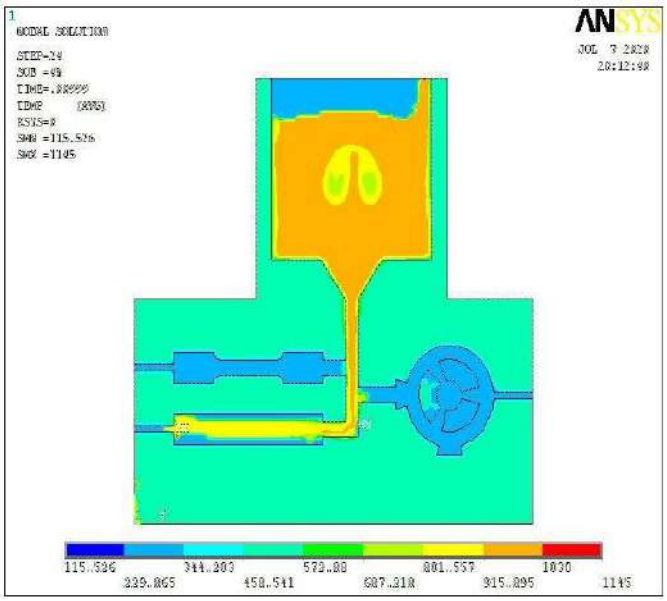


Fig. (IV.7) la variation de pression dans le temps pour de différent position.

Remarque :la pression toujours commence de la pression atmosphérique (p= 0Pa)La variation de la pression est affichée dans le moule comme elle est illustrée sur lafigure(IV.7), la valeur de la pression ,augmente jusqu'à une valeur maximale de250 MPa grâce à la convergence de la section .Il y a aussi une diminution jusqu'à une valeur de 5.00E+007 Pa à cause de dépression à travers les buses d'air de liquide.

IV.6.3 Champ de température : la figure (IV.8) montre une représentation spatiale du champ de température pendant le remplissage de moule.



T=0.00999 s.

Fig.(IV.8) Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul

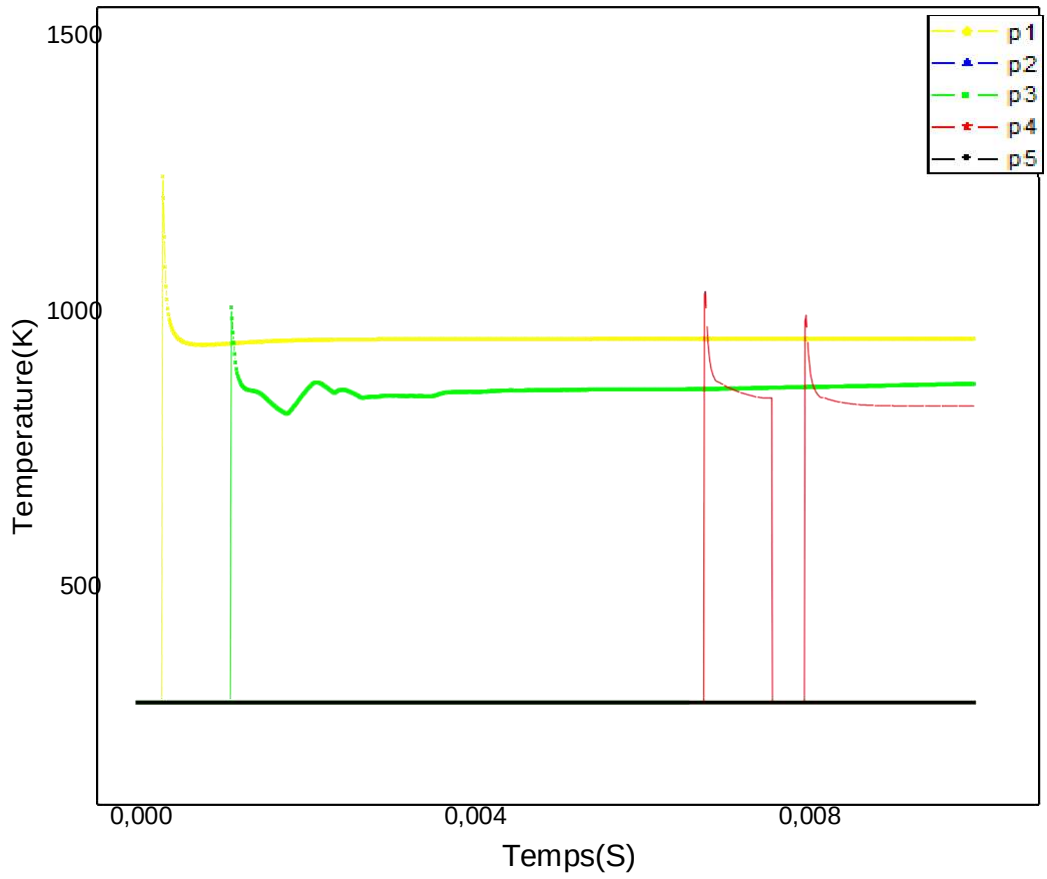


Fig.(IV.9) variation température dans le temps pour de différent position .

- **Remarque :** la température commence par une valeur constante(T=250k) dans tous les points.
- point (1) : la température augmente rapidement jusqu'à T=1250k presque (t=0.002s) à cause du Convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=900 K (t=0.003s). Après la température se stabilise à une valeur de 900k pour t=0.008 s .

- point (2) : la température constante T=250 k jusqu'à (t=0.008s) .
- point(3) : la température augmente jusqu'à T=1000K (t=0.015s) à cause du convergence de section de empreinte et après elle est diminuer jusqu'à T=800k et stable presque constante à cette valeur jusqu'à t=0.008s
- point (4) : à t=0.007 S la température augmente jusqu'à la valeur T=1100k) à cause du la grande pression de l' empreinte et après certain temps la température a t=0.008 S elle stabile à cette valeur T =800 k jusqu'à t=0.008 S

- point (5) : à t=0.001S la température est stable jusqu'à la valeur (T=250k)

pour t=0.024 s.

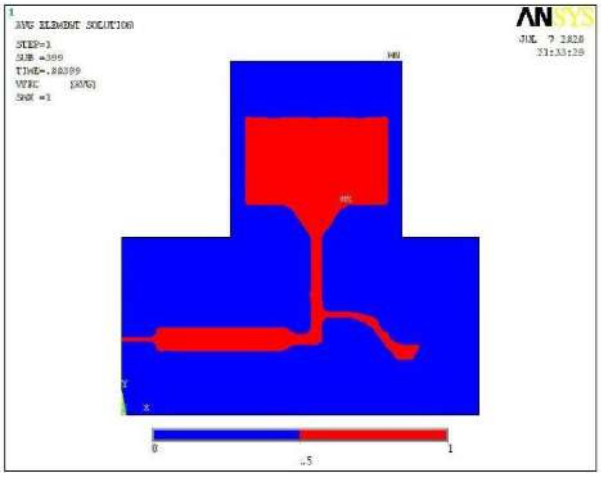
IV .7. Expérience 02: avec champ magnétique

2 éme Partie : le remplissage de métal liquide dans le moule avec champ magnétique pour un seul point

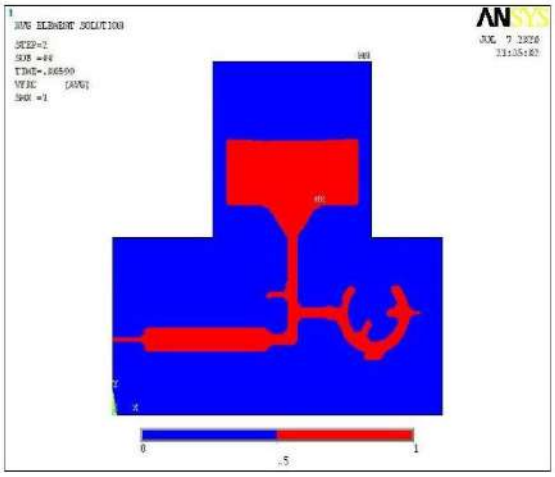
Dans cette partie on choisi un seul point de remplissage par champ magnétique (G=100000) déterminés les paramètres lié au remplissage de les empreintes. (Température, pression et le temps de remplissage)

Remplissage (Volume fraction) : la figure (VI.10) représente l'historique de l'écoulement au cour de remplissage

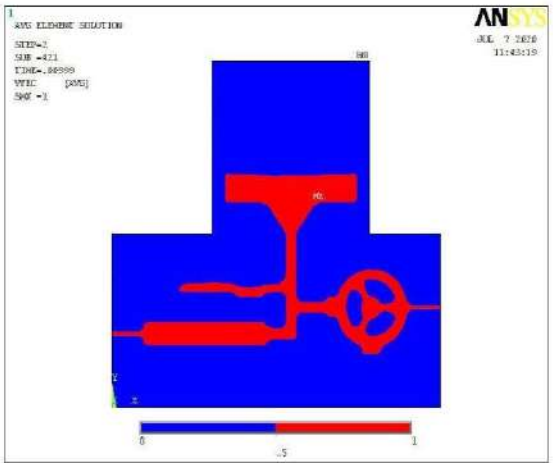
Pour la gravité (G)= 100000 N



T=0.00399s



T=0.00599s

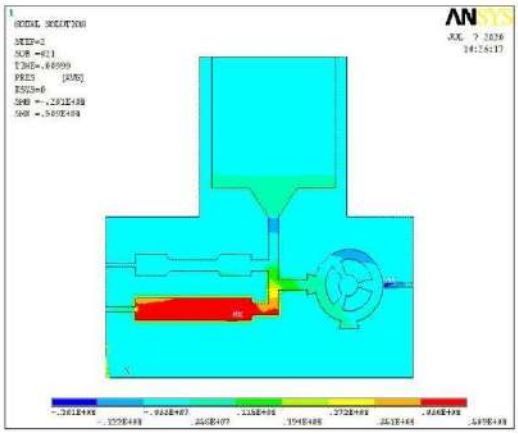


T=0.00999 s

Figure. (IV.10) Volume de fraction pendant le remplissage du moule

La figure IV.10 montre le flux de fer métallique à l'intérieur du moule à travers des tubes initialement, le flux de métal est lent, mais lorsque le volume du liquide diminue, la vitesse augmente. Ainsi, le liquide continue jusqu'à ce que le moule soit complètement rempli.

IV.7.1 Champ de pression : la figure (IV.8) représentation spatiale de pression dans le moule en fonction de temps.



T=0.00999 s

Fig.(IV.11) Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul.

La figure (IV.11) représenté le champ de pression au cours du remplissage , au démarrage la valeur de la pression est 240 MPa ,et elle diminuer jusqu'à une valeur 167M Pa au niveau de les emprentes à caus de libération de liquide.

D'après les calculs numériques,onbetune le graphe suivant :

La variation de la pression de quelque point : dans cette partie nous avons présenté la trajectoire de chaque point.

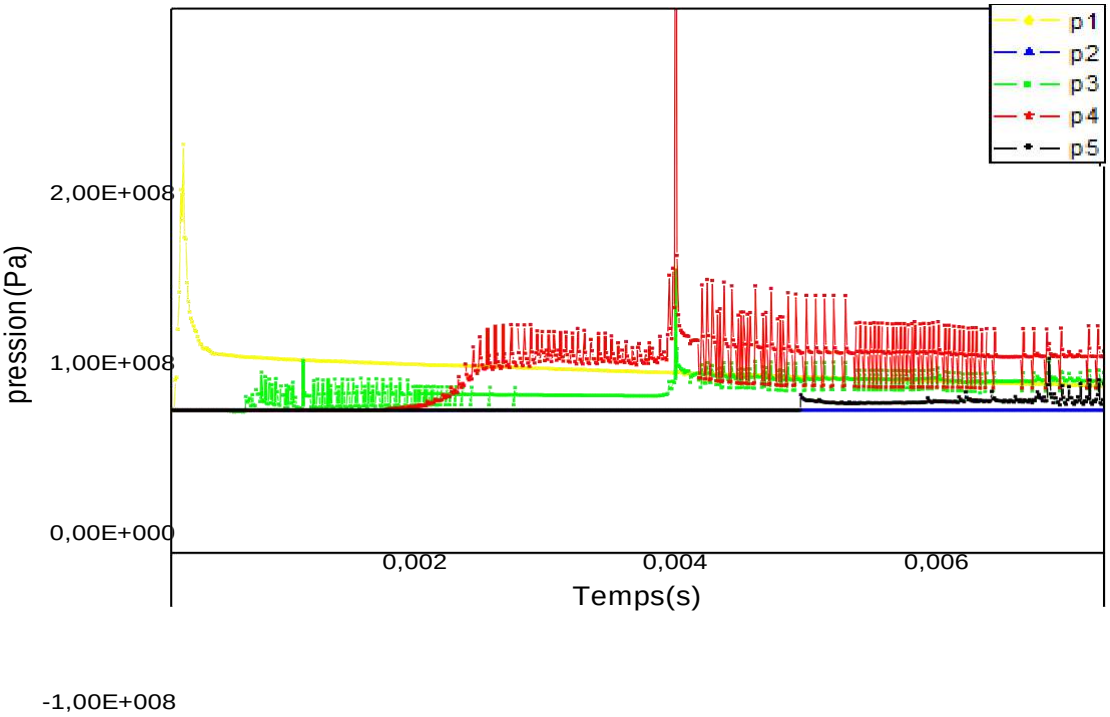
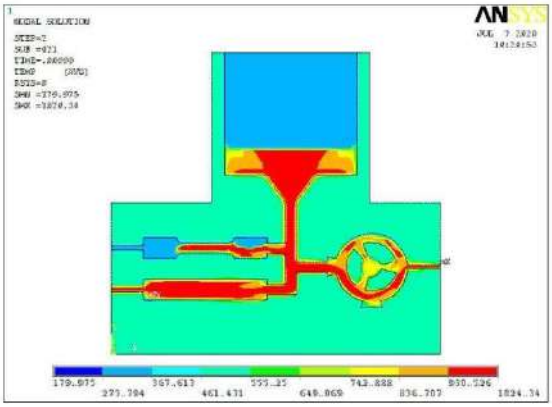


Fig. (IV.12) la variation de pression dans le temps pour de différent position.

IV.7.2 Champ de température : la figure (IV.13) montre une représentation spatiale du champ de température pendant le remplissage de moule.



T=0.00999 s

Fig.(IV.13) Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul

La température de métal à injecté initialement à 1200k, de fait de l'interaction dynamique /thermique d'un part et d'autre par les frottements pariétale ainsi, on remarque que la température au démarrage la valeur est 950 K après elle est augmente Progressivement à une température de 1000 k a la fin du remplissage.

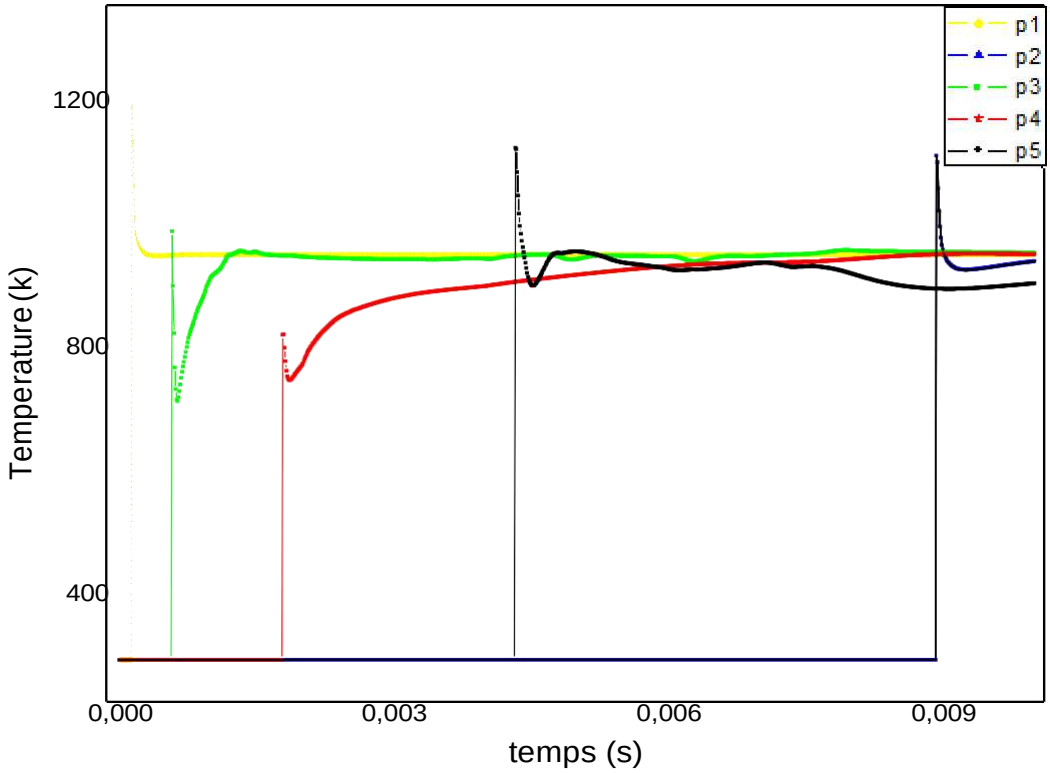


Fig.(IV.14) variation température dans le temps pour de différent position

Remarque : la température commence par une valeur constante(T=200k) dans tous les points.

- point (1) : la température augmente rapidement jusqu'à T=1200k (t=0.001s) à cause du

  Convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=900K (t=0.0012s). Après elle va : la température stable est presque constante à cette valeur jusqu'à t=0.009 s

  - point (2) : la température constante T=200 k jusqu'à (t=0.009s) Après elle va augmente rapidement jusqu'à T=1100k elle stable est presque constante à cette valeur jusqu'à t=0.009 s

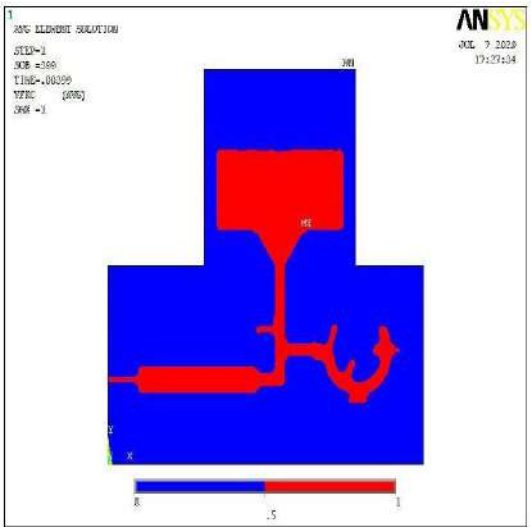
- point (3) : la température augmente rapidement jusqu'à T=1000k (t=0.001s) à cause du

  Convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=700K (t=0.0011s). Après elle va : la température stable est presque constante à cette valeur jusqu'à t=0.009 s

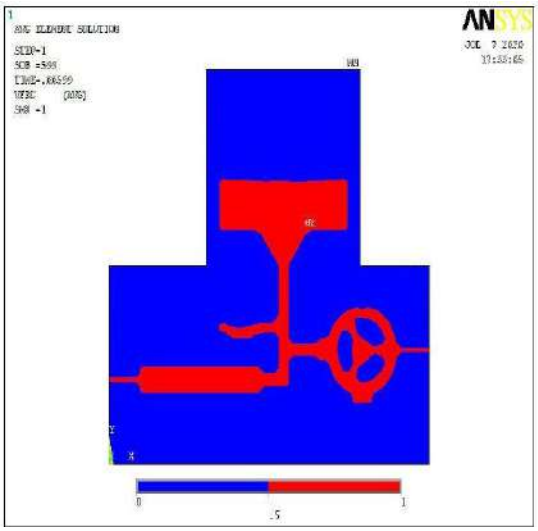
  point (4) : la température augmente jusqu'à T=800k (t=0.016s) et reste consentante jusqu'à t=0.009 s

- point (5) : la température initiale est stable a la valeur T=200k ,après est augmente rapidement jusqu'à T=1000k (t=0.0045s) , puis elle chute jusqu'à T=900K (t=0.0047s).Après elle va : la température stable est presque constante à T=860K jusqu'à t=0.009 s

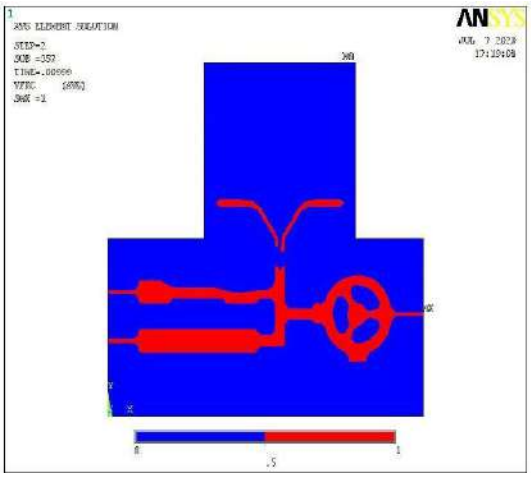
Pour la gravité (G)= 200000 N



T=0.00399 s



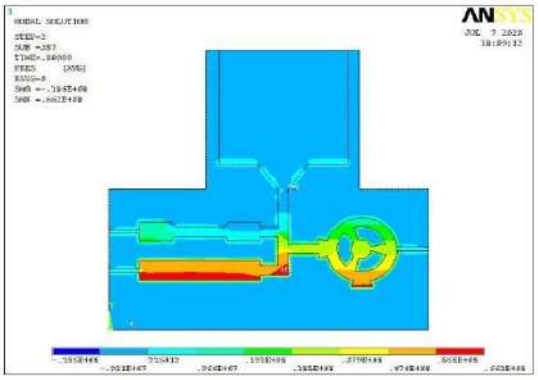
T=0.00599 s



T=0.00999 s

Figure. (IV. 15) Volume de fraction pendant le remplissage du moule

IV. 7.3.1 Champ de pression :



T=0.00999

Fig.(IV.16) Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul.

La variation de la pression de quelque point : dans cette partie nous avons présenté la trajectoire de chaque point .

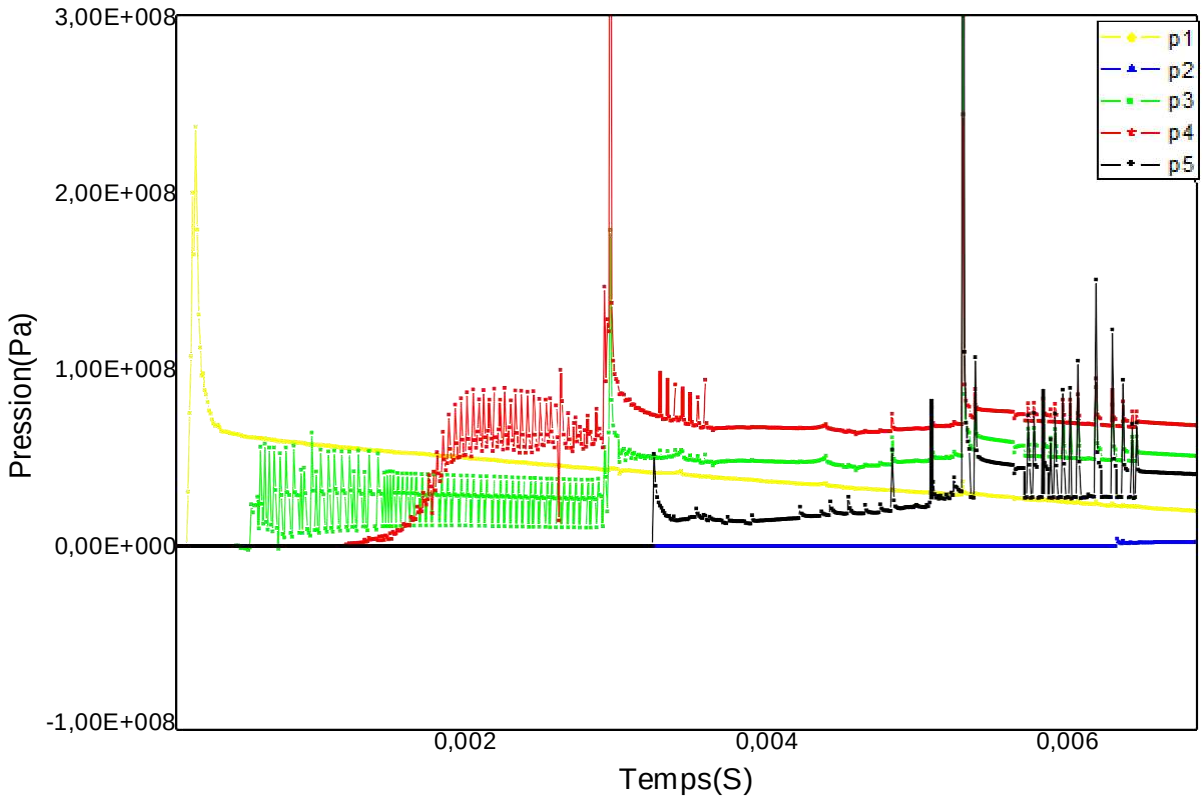
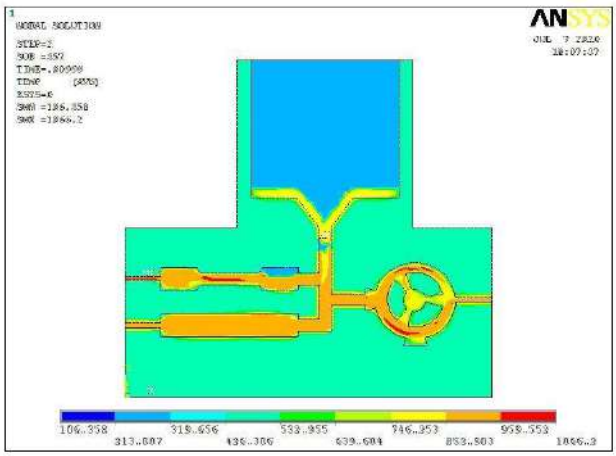


Fig. (IV.17) la variation de pression dans le temps pour de différent position.

IV.7.3.2 Champ de température :



T=0.00999 s

Fig.(IV.18) Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul

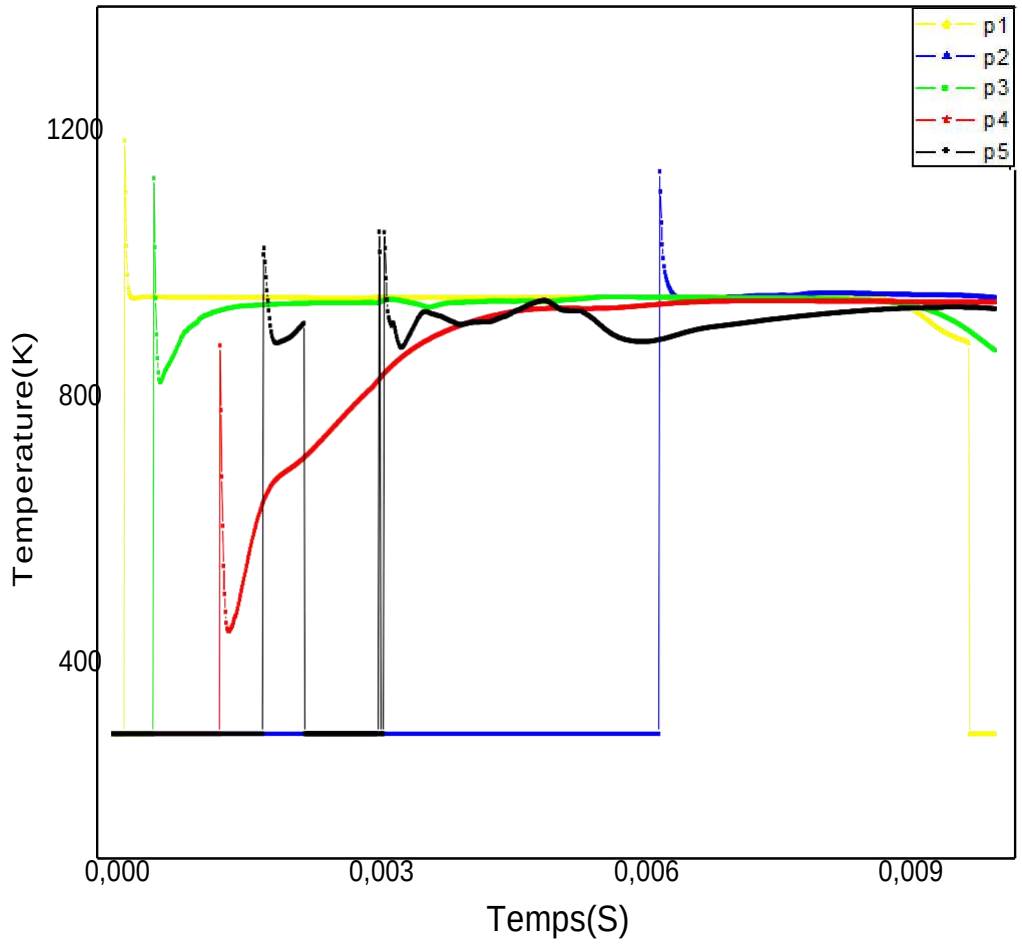


Fig.(IV.19) variation température dans le temps pour de différent position

Remarque : la température commence par une valeur constante(T=250k) dans tous les points.

- point (1) : la température augmente rapidement jusqu'à T=1200k (t=0.001s) à cause du

Convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=950K (t=0.0011s). Après elle va : la température stable est presque constante à cette valeur jusqu'à t=0.009 s

- point (2) : la température constante T=250 k jusqu'à (t=0.017s) Après elle va augmente rapidement jusqu'à T=1100k puis elle chute jusqu'à T=950K (t=0.0067s), Après elle va : la température stable est presque constante à cette valeur jusqu'à t=0.009 s

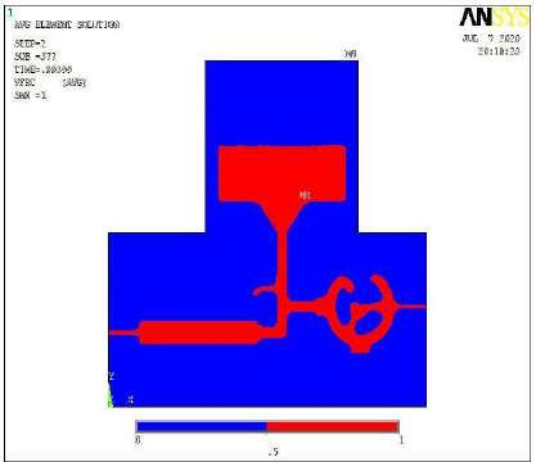
- point (3) : la température augmente rapidement jusqu'à T=1100k (t=0.0012s) à cause du Convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=850K (t=0.0012s). elle puis la température augmente jusqu'à T=970k a (t=0.0016s) , la température stable est presque constante à cette valeur jusqu'à t=0.009 s

point (4) : la température augmente jusqu'à T=900k (t=0.0014s) puis elle chute jusqu'à T=450K (t=0.0015s). puis la température augmente jusqu'à T=1000k a (t=0.006s) et reste consentante jusqu'à t=0.009 s .

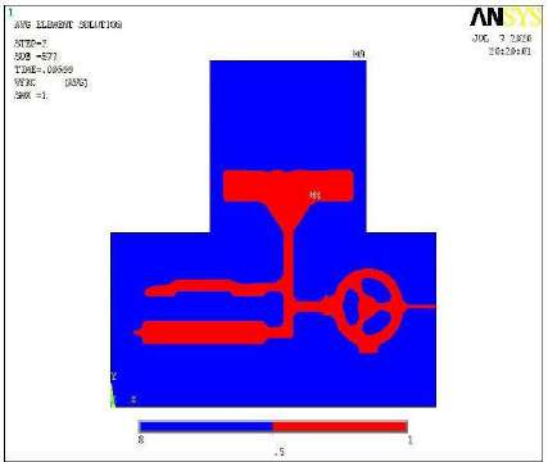
- point (5) : la température augmente rapidement jusqu'à T=1100k (t=0.0015s)

, puis elle chute jusqu'à T=900K (t=0.0016s). puis la température augmente jusqu'à T=950k a(t=0.0017s) est diminue jusqu'à la valeur T=950 k a T=0.002 s , après augment rapidement jusqu'à T=1000 k à T= 0.003 s, puis elle chute jusqu'à T=900K (t=0.0035s) ,et la température augmente jusqu'à T=950 k , Après elle va : la température stable est presque constante à T=900K jusqu'à t=0.009 s .

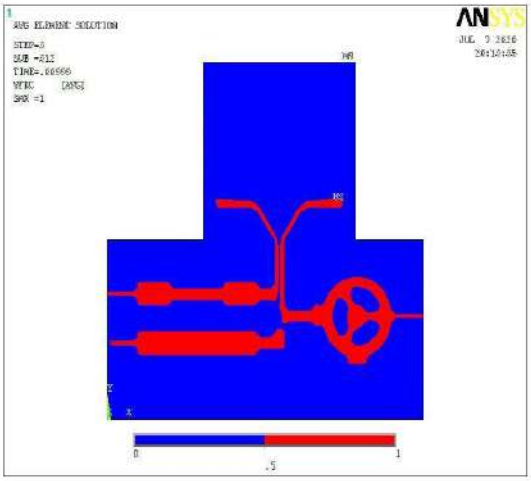
Pour la gravité (G)= 310000 N



T=0.00399 s



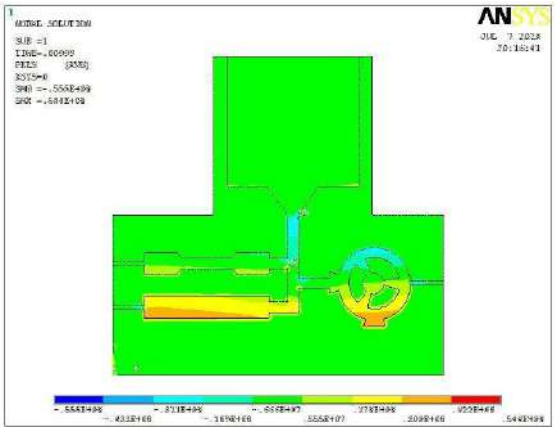
T=0.00599 s



T=0.00999 s

Figure. (IV.20) Volume de fraction pendant le remplissage du moule

IV.7.4 Champ de pression :



T=0.00999 s

Fig.(IV.21) Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul.

D'après les calculs numériques,onbetune le graphe suivant :

La variation de la pression de quelque point : dans cette partie nous avons présenté la trajectoire de chaque point qu'on a déjà sélectionné

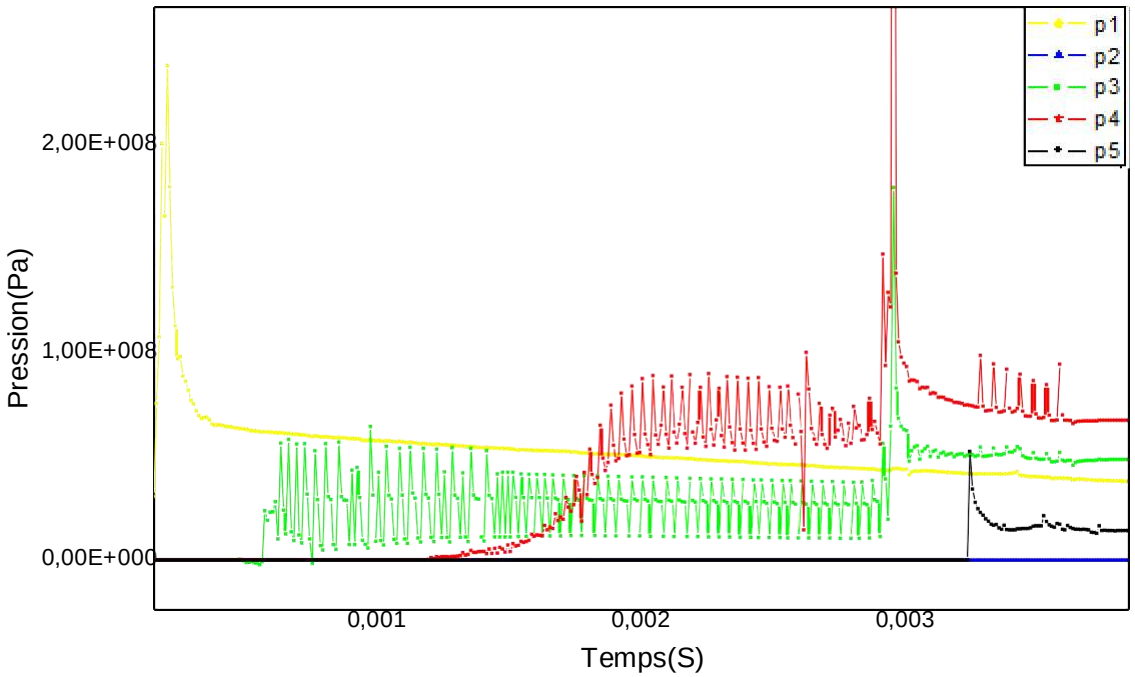
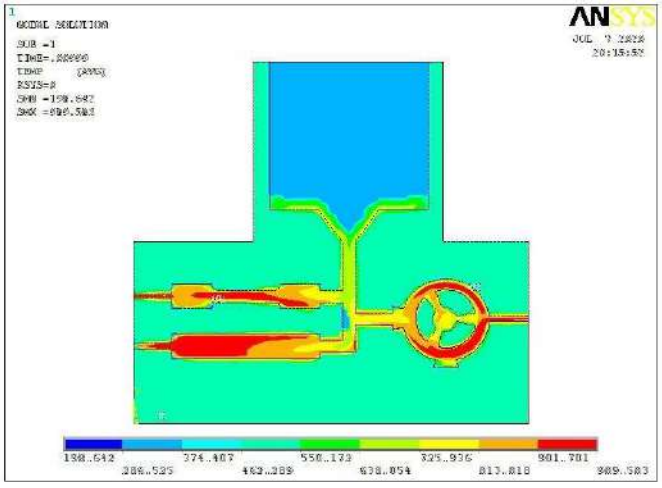


Fig. (IV.22) la variation de pression dans le temps pour de différent position.

IV.7.4.1 Champ de température :



T=0.00999 s

Fig.(IV.23) Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul.

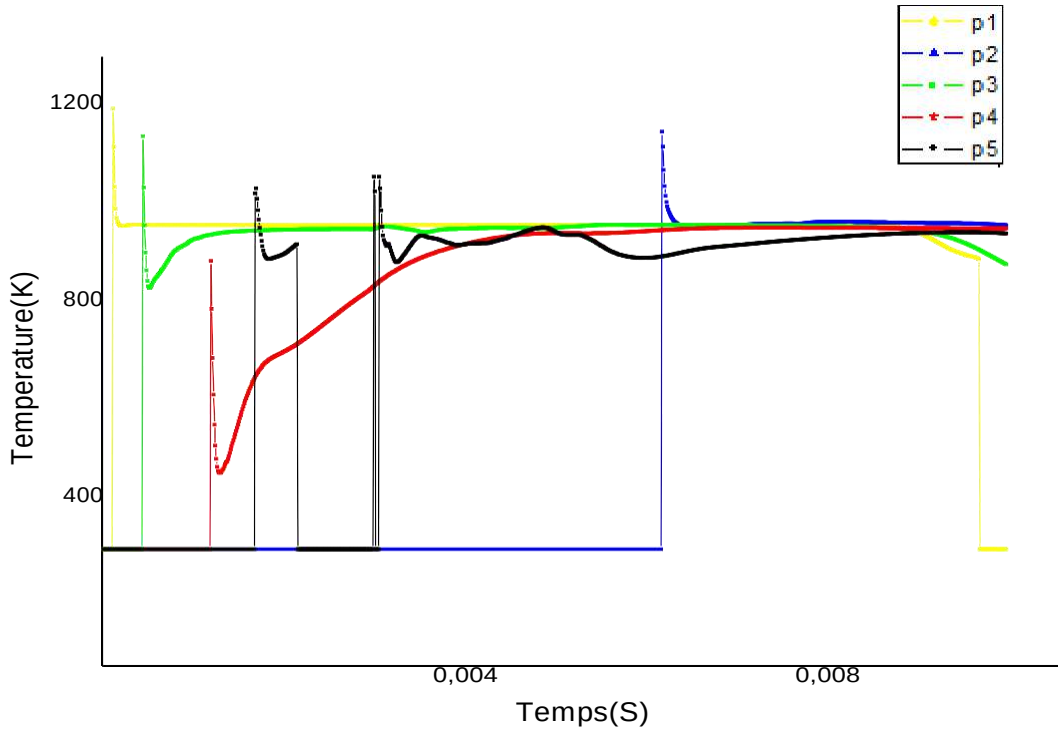


Fig.(IV.24) variation température dans le temps pour de différent position

Remarque : la température commence par une valeur constante(T=250k) dans tous les points.

- point (1) : la température augmente rapidement jusqu'à T=1200k (t=0.001s) à cause du

  Convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=950K (t=0.0012s). Après elle va : la température stable est presque constante à cette valeur jusqu'à t=0.008 s ,après la température est diminue j'usqua T=250 k.

  - point (2) : la température constante T=250 k jusqu'à (t=0.006s) Après elle va augmente rapidement jusqu'à T=1100k puis elle chute jusqu'à T=1000K (t=0.0067s). elle stable est presque constante à cette valeur jusqu'à t=0.008 s

- point (3) : la température augmente rapidement jusqu'à T=1100k (t=0.001s) puis elle chute jusqu'à T=850K (t=0.0012s). la température augmente jusqu'à T=1000k (t=0.0019s) Après elle va la température stable est presque constante à cette valeur jusqu'à t=0.008 s .

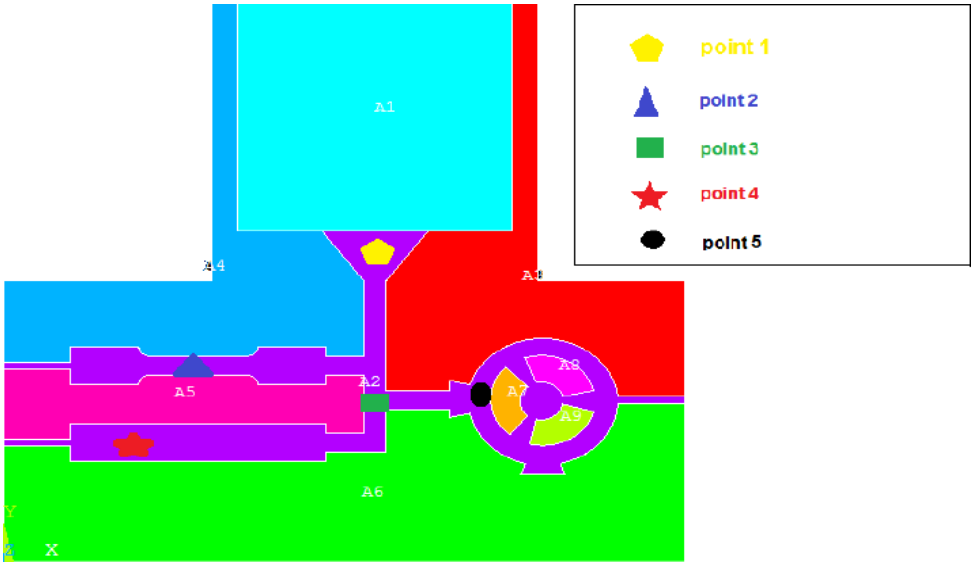
- point (4) : la température augmente jusqu'à T=900k (t=0.0015s) puis elle chute jusqu'à T=500K (t=0.0017s) ,la température augmente rapidement jusqu'à T=950k (t=0.0065s) et reste constante jusqu'à t=0.008s .

- point (5) : la température initiale est stable a la valeur T=250k ,après est augmente rapidement jusqu'à T=1000k (t=0.002s) .

dans le expérience 02 la meilleur remplissage de moule pour gravité G=310000 N.

IV.8 l'emplacement des capteurs pour l'analyse :

Pour connaître la variation des grandeurs physique (la température, la pression, la vitesse, …)



pour déférents zones préférable, on a choisies des points différents dans la pièce

Fig.(IV.25) : les points choisis à une section du moule

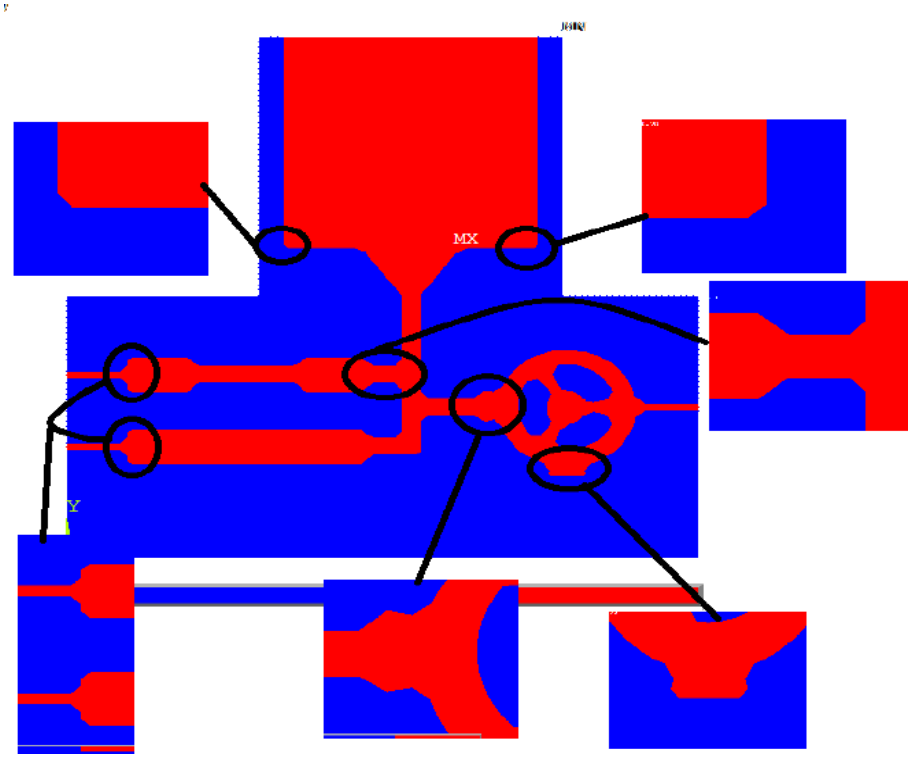


Figure (VI.26) : détection des défauts de remplissage dans les empreintes.

On a vu que les défauts de remplissage avec champ magnétique sont les même comme la 1ere expérience sans champ magnétique .

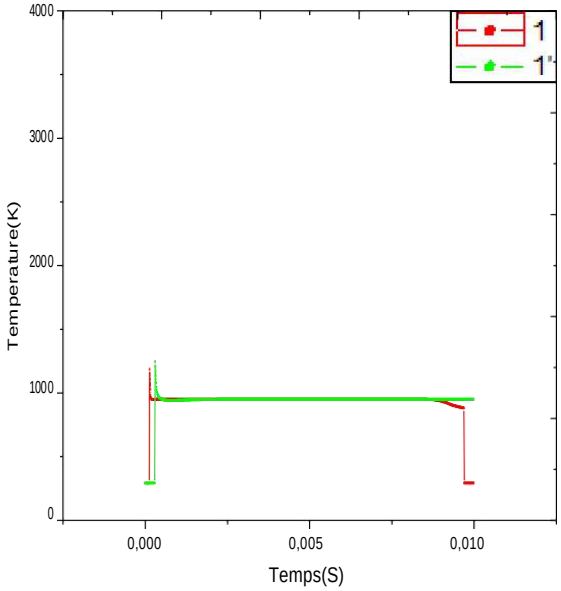
IV.9 Comparaison entre la première et la deuxième expérience :

Dans cette partie on a comparé entre les deux expériences (la première et la deuxième simulation) c'et à dire on compare par le suivie de trajectoire de remplissage ,par les capteurs installer.

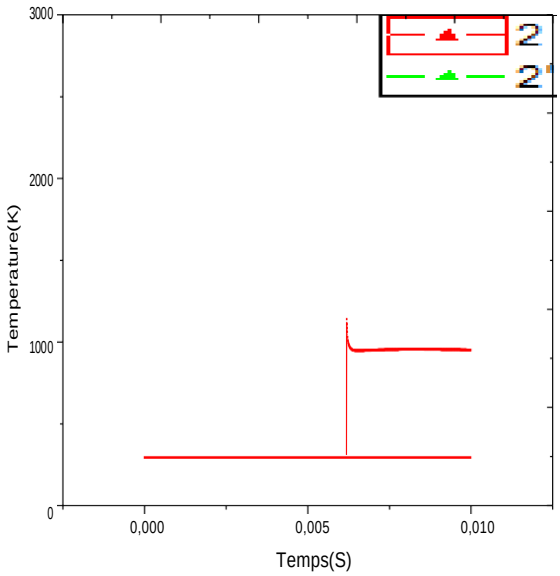
La couleur rouge Spectacle expérience 02 (le champ magnétique pour G=310000 N).

La couleur ver spectacle expérience 01(sans champ magnétique).

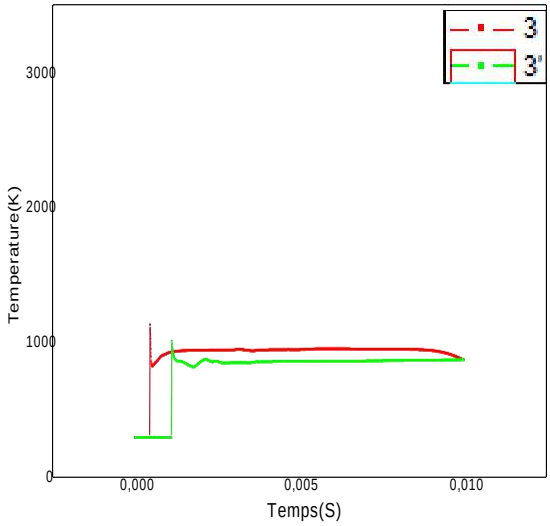
IV. 9.1 : température :



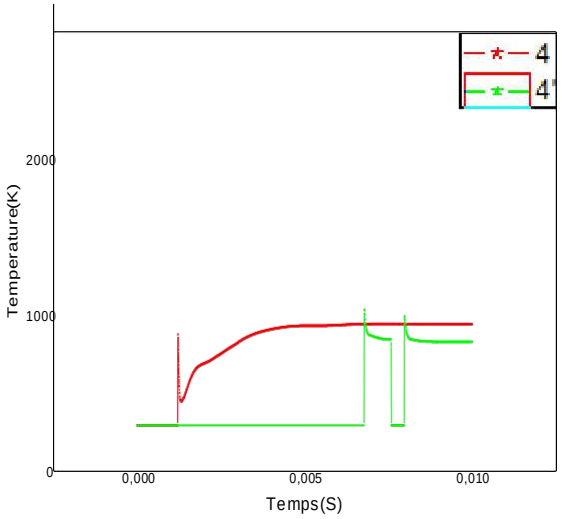
(1)



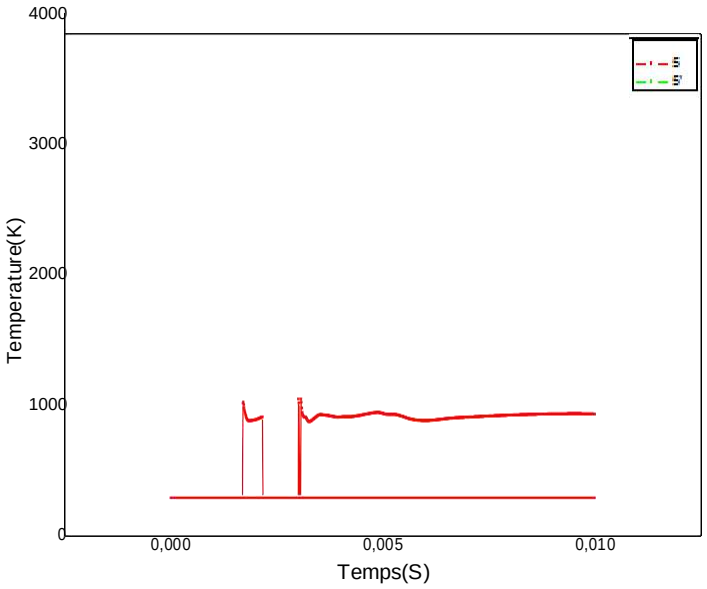
(2)



(3)



(4)



(5)

Figure (IV.27) Comparaison entre les Champs des températures dans chaque point pour les deux simulations.

Nous comparons la variation de champ des températures dans chaque point pour les deux simulations.

- point(1):La variation de la température maximale dans le graphe(1) avec un écart de 0 K dans les points (1,1') après la températures constante a même valeur de 1000 k

Citons que le liquide en deuxième simulation le même point et le même temps, se refroidi avant ceux qui de premier simulation.

- Point2 : La variation de la température maximale de le graphe(2), dans le point 2 la température est augmente par rapport le point 2' la température constante

Citons que le liquide en première simulation, se refroidi avant ceux qui de deuxième simulation.

- point(3): La variation de la température maximale de le graphe(3) avec un écart de 100 K dans les points (3,3') la température est déférente entre les deux pointes

Citons que le liquide en première simulation le même point et le même temps se refroidi avant ceux qui de deuxième simulation.

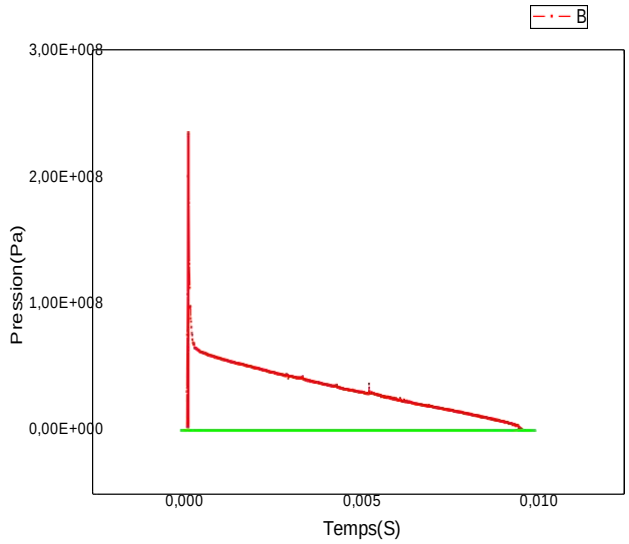
- point(4):La variation de la température maximale de le graphe(4) avec un écart de 200 K est après, le pointe (4) la température constante avec une valeur de 1000 k

Citons que le liquide en première simulation se refroidi avant ceux qui de deuxième simulation.

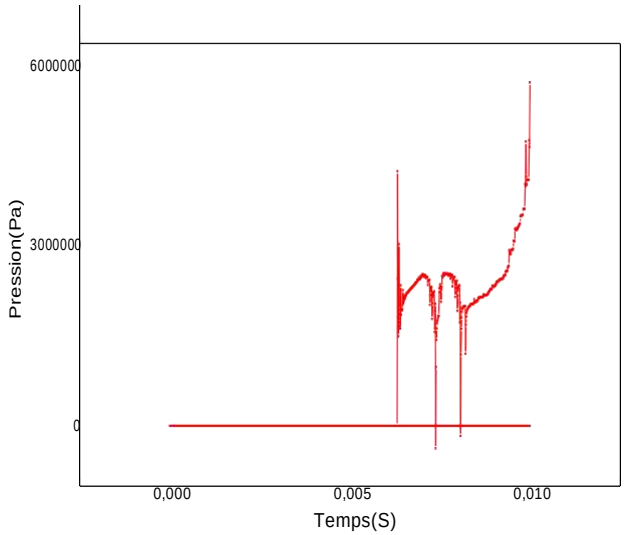
- point(5) : la température maximale dans le pointe (5) est 1100k mais le pointe (5') la température est constante en tout temps T=250 k

Citons que le liquide en première simulation se refroidi avant ceux qui de deuxième simulation.

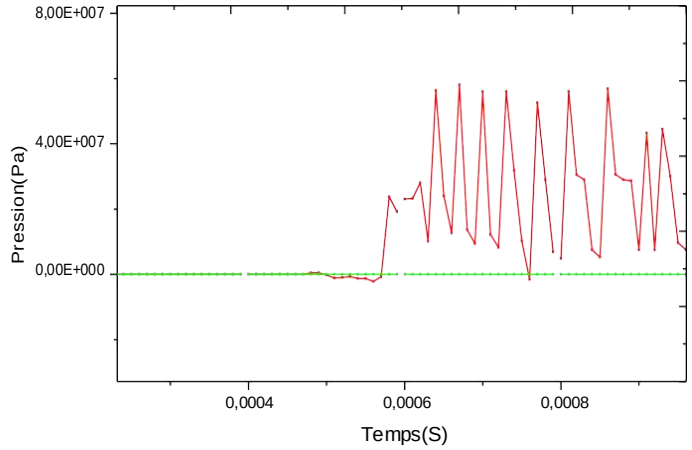
IV. 9.2 : champ de pression:



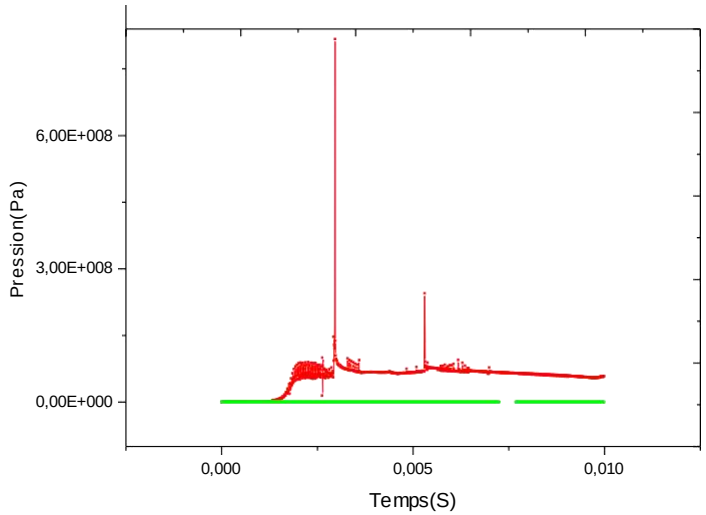
(1)



(2)


8,00E+007
4,00E+007
0,00E+000
Pression(Pa)
0,0004
0,0006
0,0008
Temps(S)

(3)


6,00E+008
3,00E+008
0,00E+000
Pression(Pa)
0,000
0,005
0,010
Temps(S)

(4)

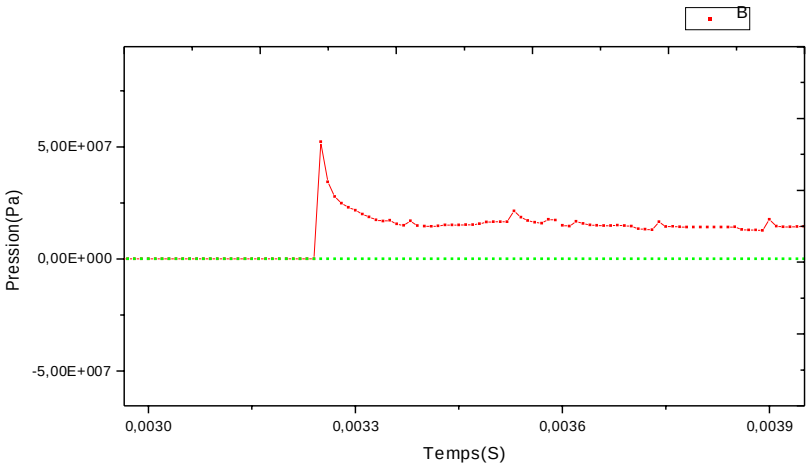


Figure (IV.28) Comparaison entre les Champs des Pression dans chaque point pour les deux simulations.

Nous comparons la variation de champ des pressions dans chaque point pour les deux simulations.

- point(1): le champ de pression (la valeur maximale) de le graphe(1) dans le point (1) est P=200PMa . Plus la pression est élevée, plus le fluide est chaud.

la pressions de liquide en deuxième simulation se haut avant ceux qui de première simulation.

- Point2 : le champ de pression (la valeur maximale) de le graphe(2) à point (2) est P=6MPa. . Plus la pression est élevée, plus le fluide est chaud.

la pressions de liquide en deuxième simulation se haut avant ceux qui de première simulation.

- Point3 : le champ de pression (la valeur maximale) de le graphe(3) à point (3) est P=40MPa . Plus la pression est élevée, plus le fluide est chaud.

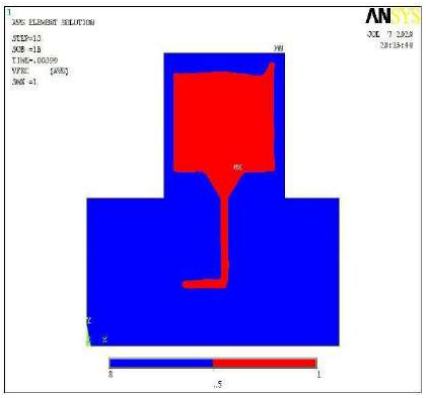
la pressions de liquide en deuxième simulation se haut avant ceux qui de première simulation.

- Point4 : le champ des pression (la valeur maximale) de le graphe(4) à un point (4) est P=760MPa , mais la pression à la point (4') est constante en tout temps. Plus la pression est élevée, plus le fluide est chaud, la pressions de liquide en deuxième simulation se haute avant ceux qui de première simulation.

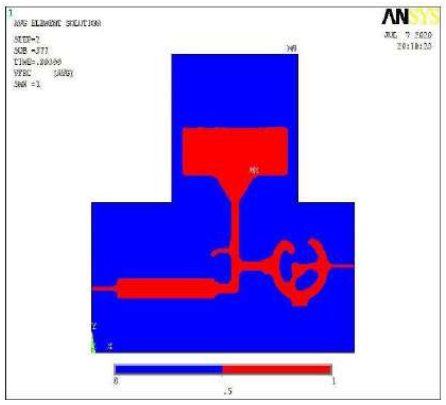
➢ Point5 : le champ de pression(la valeur maximale) de le graphe(5) à point (5)est P=50MPa, mais la pression à la point (5') est constante en tout temps.

la pressions de liquide en deuxième simulation le même point et le même temps se haute avant ceux qui de première simulation.

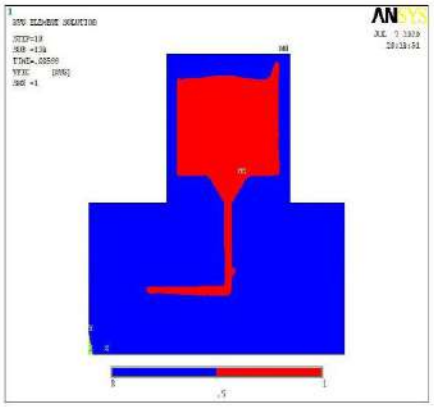
Sans champ Magnétique : **champ Magnétique avec G=310000N**



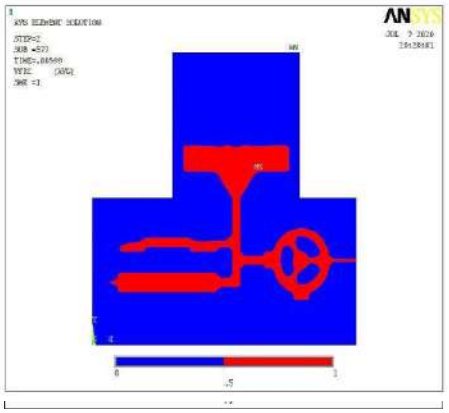
T=0.00399 s



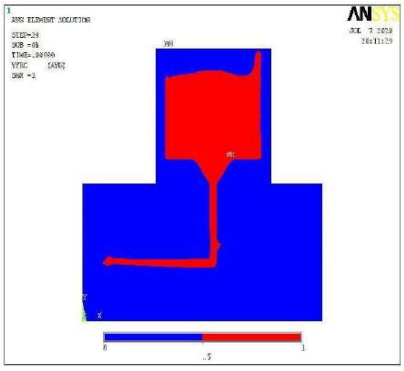
T=0.00399 s



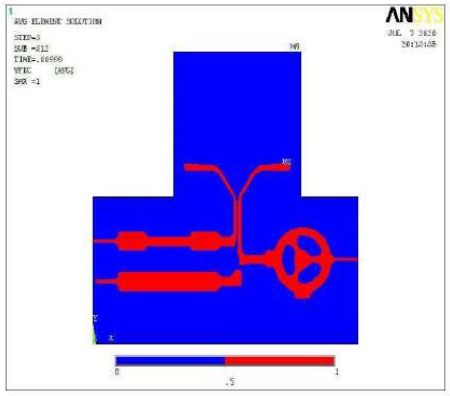
T=0.00599 s



T=0.00599 s



T=0.00999 s



T=0.00999 s

Fig. (IV.29) Volume de fraction pendant le remplissage du moule

IV. 10 Conclusion :

Dans ce chapitre ; Nous avons cité deux simulations indiquant la même zone (la première simulation sans champ magnétique et la douzième simulation avec champ magnétique), pour vérifier le remplissage des moules; En utilisant trois valeurs de gravité différentes, en plus de cela, la simulation nous a permis de mieux comprendre la distribution de tous les paramètres: (pression, température et temps pour remplir le moule) et de comparer la référence de température et la pression de chaque point pour indiquer la simulation après avoir trouvé quelques observations:

- Temps de remplissage avec moins de champ magnétique sans champ magnétique
- La température et la pression (vitesse) à la fin du remplissage dans le champ magnétique sont supérieures au champ magnétique
- Plus la pression est élevée, plus le fluide est chaud

Bibliographie :

[1] DR .S.BENSAADA , cours de FONDERIE ET SOUDAGE[EUE2010].

[2] Michel Bollet et thierry coupez ,Etude Numerique du remplissage 3D en fonderie ,le 8 septembre 2003.

[3] https://www.scribd.com/document/46804006/Les-Alliages-Et-Le-Moulage.

[4] Moulage des métaux et polymères Cours de construction TGMB2.

[5] D. Gelin,M ,vincent, « Eléments de fabrication »,les Editions Foucher ,1995.

[6] https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:LVutGhxI0UUJ:https://fr.scribd.com/document/343742496/Moulages-Des-Alliages-d-Aluminium-Generalites-moules-Destruc+&cd=3&hl=ar&ct=clnk&gl=dz&client=firefox-b-d

[7] les procédés de mise en forme et de prototypage.

[8] Aluminium laufen S.A , « Documentation technique : moulage en coquille» ,2007,site : http:// WWW ,alu-laufen .

[9] Auteurs multiples, *Les alliages d'aluminium moulés*, [CD-ROM], Paris, Centre technique des industries de la fonderie et Centre québécois de la recherche et du développement de l'aluminium, 2002.

[10] cours Procédés de mise en forme par moulage Mme GARA SOUHIR 2017

[11] S. Kunstreich, La Revue de Métallurgie - CIT 2003, 104

[12] J. Li, B. Wang, Y. Ma, J. Cui, Mater. Sci, ing. A 2006, 426, 201.

[13] H. Liu, J. Rao, Modélisation couplée du problème électromagnétique-thermique dans l'induction
processus de chauffage en tenant compte des propriétés des matériaux, Inform. Eng. Comput. Sci. 1–4(2009).

[14] Y. Sundberg. Paper 609. Vil UIE Congress, Warsaw, Sept. 1972.

[15] H.Yaniane, Y.Ohtani, J.Fukuda, T.Kawdse, J.Nakashima, A.Kiyose,; High power in-mold electromagnetic stirrer -

Improvement of surface defects and inclusion control, Steelmake Conf Proc, **Vo1.80,** pp. 159-164,1997

[16] D. Vizman, B. Fischer, J. Friedrich, G. Müller, 3D numerical simulation of melt flow in the presence of a rotating magnetic field, Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow. 10 (2000) 366–384.

[17] M.R. Bridge, G.D. Rogers, Structural effects and band segregate formation during the electromagnetic stirring of strand-cast steel, Metall. Trans. B. 15 (1984) 581–589

[18] B. Chen. Research and Implementation on Parallel Computing Technology of Casting Processes Numerical Simulation., Huazhong University of Science and Technology, 2007.

[19] G. Wang, S. Xiong, Z. Du, Parallel search algorithm for mold filling simulation of die casting process, Journal of Tsinghua University (Science and Technology), (2002) 1042-1044.

[20] L. Yan. Parallel Software Development on Mold-filling Simulation of Casting Processes., Chongqing University, 2008.

[21] G. Wang, S. Xiong, B. Liu, Parallel domain decomposition algorithm based on Schwarz chaotic relaxation for die casting mold filling simulation, Journal of Tsinghua University (Science and Technology), (2005) 581-584.

[22] Roudouane Laouar, Olaf Wünsch « Numerical simulation and analysis of molten flow in the shot sleeve of die casting process » Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Volume 10, 16 NOV 2010, p 471-472.

[23] Suhas V. Patankar, « Numerical heat transfer and fluid flow » Edition series in computational methods in mechanics and thermal sciences, 1980

[24] http://aurore.unilim.fr/theses/nxbigfile/default/0b9b8206-a9ad-4e98-8108-afdd5506fda2/blobholder:0/2006LIMO0065.pdf

[25] http://thesis.univ-biskra.dz/2157/4/chapitre%2002.pdf

[26] https://monsite-a-oim.pagesperso-orange.fr/thai/thermi4.pdf

[27] https://di.univ-blida.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/4053/1/051-2011.pdf

[28] http://www.librecours.org/documents/72/7213.pdf

[29]https://fr.wikibooks.org/wiki/M%C3%A9thode_des_%C3%A9l%C3%A9ments_finis/Mailler_un_ensemble

[30]B. Sirrel, M. Holliday, J. Campbell. The benchmark test 1995. MCWASP VII,

« Modelling of casting, welding and advanced solidification processes » The Minerals, Metal & Materials Society TMS, 1995, p 915-933.

[31]R. Winther, « Numerical Methods for Incompressible Viscous Flow »Disponibl sur : http://www.ifi.uio.no/nmfpd/dokumentasjon/nsreview.pdf.

[32]C. Meuland, « Implementation de la solidification sous REM3D® » rapport intermédiaire, 2003.

[33]http://www.cadfem-an.com/produits/ansys.html